

VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Hornicko-geologická fakulta

Katedra environmentálního inženýrství

Optimalizace technologických procesů při využití stavebních a demoličních
odpadů ve výrobě asfaltových a betonových směsí

Optimization of technological processes in the use of construction and
demolition waste in the production of asphalt and concrete mixtures

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor:

Bc. Rudolf Vraný

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jaroslav Mudruňka, Ph.D.

Ostrava 2021

Anotace:

Práce se zabývá problematikou využitelnosti stavebních a demoličních odpadů a jejich možností implementace do výrobních procesů v daném podniku. Využití recyklovaných materiálů namísto primárních nebo sekundárních vstupních surovin se vyplatí nejen ekonomicky, ale také snižuje zátěž na ukládání odpadů. Cílem této práce bylo ověřit optimální možnosti využití všech druhů odpadů, které jsou využitelné ve výrobě betonových a asfaltových směsí. Při použití správných metod kontroly odpadů na vstupu a vhodného způsobu recyklace ve vybraném podniku bylo dosaženo minimálně stejné kvality výsledného produktu (betonových a asfaltových směsí). Pomocí laboratorních zkoušek, testů a výpočtu byla kvalita výsledného produktu ověřena.

Klíčová slova:

Odpady; recyklace; optimalizace; technologické procesy; využitelnost; stavební a demoliční odpady; laboratorní zkoušky; podmínky ukládání; vstupní suroviny

Summary:

The work deals with the issue of usability of construction and demolition waste, their possibility of implementation into production processes in the company. The use of recycled materials instead of primary or secondary input materials not only pays off economically, but also reduces the burden of waste disposal. The aim of this work is the maximum usability of all types of waste that are usable in the production of concrete and asphalt mixtures. By using the correct methods of input waste control and recycling, at least the same quality of the final product can be achieved in this case of concrete and asphalt mixtures. With the help of laboratory tests, trials and calculations, the quality of the final product can be verified. Laboratory test results play a pivotal role in this work.

Key words:

Waste; recycling; optimalization; technological processes; usability; construction and demolition waste; laboratory tests; storage conditions; input raw materials

OBSAH

1	ÚVOD A CÍL	1
2	CHARAKTERISTIKA STAVEBNÍCH SUROVIN A MATERIÁLŮ	3
2.1	Historie a význam stavebních materiálů	4
2.2	Rozdělení stavebních materiálů	5
2.3	Vstupní primární suroviny ve výrobě betonů	20
2.4.	Vstupní primární suroviny ve výrobě asfaltových směsí.....	24
3	CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE VÝROBY ASFALTOVÝCH A BETONOVÝCH SMĚSÍ VE VYBRANÉM PODNIKU.....	27
3.1	Metodické postupy ověřování vlastností vstupních odpadních materiálů	27
3.2.	Vstupní sekundární suroviny ve výrobě asfaltových směsí.....	29
2.4	Vstupní sekundární suroviny ve výrobě betonů.....	30
3.1	Technologické postupy v obalovně živičné směsi	34
3.2	Technologické postupy v betonárně	36
4	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ LABORATORNÍCH ZKOUŠEK	37
4.1	Metodické postupy laboratorních zkoušek.....	37
4.2.	Betonové směsi.....	41
4.3.	Asfaltové směsi	45
5	ZÁVĚR.....	55
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	
	SEZNAM OBRÁZKŮ	
	SEZNAM TABULEK	

1 ÚVOD A CÍL

Současný nárůst stavební činnosti vytváří stále více odpadů. Proto mnohé firmy, buď samy provozují, nebo jen využívají služeb recyklačních center. Na skládkách odpadů by proto měly skončit pouze ty odpady, které jsou již nerecyklovatelné. V této problematice je důležité dodržet legislativní podmínky týkající se ukládání odpadů a poté i správné testování zdravotní nezávadnosti již recyklovaných odpadů. Současný trend úspory primárních surovin a opětovné využití stavebních odpadů vytváří širší škálu využitelnosti recyklátů.

Asfaltový recyklát je vhodný pro použití zpět do pozemní komunikace, a to pro funkci zpevněného povrchu, nebo zpět do výroby asfaltové směsi. Betonový recyklát může v některých případech nahradit přírodní kamenivo. Především ve výrobě betonů se objevují nové receptury obsahující recyklovaný beton, cihly a další stavební odpad. Recyklát použitý ve výrobě musí splňovat technické požadavky a neměl by obsahovat druhotné suroviny.

Proto je třeba důsledně kontrolovat odpady při přijímání na vstupu a správně postupovat při jejich recyklaci. Pokud jsou tyto postupy dodrženy, lze říci, že veškerý materiál vyrobený z odpadů lze využít. Podle požadavků na výrobu se uplatňují příslušné recyklační metody. K ověření kvality recyklačních procesů se využívají laboratorní analýzy, kde se nejčastěji zkoumá rozmezí velikosti zrn, sypná hmotnost, soudružnost, prašnost a vlhkost. Z hlediska bezpečnosti práce a zvyšujícími se podmínkami na ochranu životního prostředí, musejí být při recyklaci dodrženy legislativní podmínky, které vyplývají z provozního řádu daného podniku.

Odpady tvořené betonem a asfaltem vstupují do výroby asfaltových a betonových směsí sekundárně. Primární vstupní suroviny mají na výsledný produkt vliv, z hlediska koloběhu odpadů. Výsledný produkt by se v budoucnu mohl stát také odpadem, proto tato práce popisuje nejen odpady vstupující do výroby asfaltových a betonových směsí, ale také primární vstupní suroviny používané ve výrobě. Normy vstupních primárních surovin jsou udávány dodavatelem. Z tohoto důvodu se tato práce věnuje ve velké míře laboratorním zkouškám odpadů vstupujících do výroby a testováním výsledného produktu výroby.

Cílem práce je navrhnout a prakticky odzkoušet možnosti využití co největšího množství odpadů v technologii výroby asfaltových a betonových směsí ve vybraném podniku. Podružným cílem práce je ověřitelně prokázat kvalitu výsledného produktu pomocí laboratorních zkoušek a výpočtů.

2 CHARAKTERISTIKA STAVEBNÍCH SUROVIN A MATERIÁLŮ

Obsah této kapitoly obsahuje charakteristiku všech materiálů vstupujících do výroby asfaltových a betonových směsí. Dále popisuje stavební materiály jako hotové výrobky, z důvodu opětovného vracení stavebních materiálů zpět do procesu ve formě stavebních a demoličních odpadů. Z hlediska odpadů je nejvíce pozornosti věnováno vybourané asfaltové směsi z vozovky a betonovému odpadu získaného ze stavebních demoličních činností. Oba tyto odpady mají různé legislativní podmínky pro jejich ukládání na skládky, v našem případě na recyklační plochu. Před každým vstupem odpadu na recyklační plochu, musejí odpady splňovat dané podmínky provozního řádu určitého podniku. Podmínky provozního řádu schvaluje krajský úřad, spolu s příslušnou hygienickou stanicí. (Herkul, 2015)

Odpady mohou ukládat jak právnické osoby, tak i fyzické osoby. Platí pro ně různé podmínky. Při ukládání odpadů fyzickými osobami je třeba vyplnit čestné prohlášení a doložit laboratorní zkoušky o zdravotní nezávadnosti odpadu, na recyklační plochy nelze ukládat nebezpečný odpad. V případě osob právnických k čestnému prohlášení a požadovaným zkouškám je třeba doložit navíc základní popis odpadu, při opakovaném ukládání pouze čestné prohlášení. Pokud jsou tyto podmínky splněny, s odpadem se může dále nakládat ve smyslu drcení a třídění. Výsledný recyklovaný produkt také musí být testován, aby se zjistilo, zda nebyl během technologie recyklace kontaminován, obvykle se jedná o každých 5 000 t čistého recyklátu. Požadované množství podléhající pravidelnému testování je uvedeno v provozním řádu recyklační plochy. Tyto hodnoty má na starost kontrolovat osoba odpovědná za odpadového hospodářství v daném podniku. Vzorky si může odebrat sama laboratoř nebo osoba k tomu proškolená, dle zákona o odpadech. Osoba odpovědná za odpadového hospodářství v daném podniku je povinna shromažďovat tyto informace pro následnou kontrolu z ministerstva životního prostředí. (Herkul, 2015)

Mezi primární vstupní suroviny lze zařadit veškerý přírodní i umělý stavební materiál, který by měl být testován před vstupem do výroby. Tyto legislativní hodnoty udává a je za ně zodpovědný dodavatel. V následující kapitole jsou popsány všechny druhy, historie a možnosti získávání stavebních materiálů, které by mohly vstoupit

do výroby. Můžeme mezi ně zařadit horniny, stavební kámen, dřevo a výrobky ze dřeva, keramické výrobky, pojiva, malty a betony, živice, izolační materiály a pomocné materiály. (Jungmann a kol., 2019)

2.1 Historie a význam stavebních materiálů

Stavební materiály reprezentují velký podíl látkových forem hmoty. Ve stavebnictví se tyto formy dají formulovat jako pojem stavební hmoty. Jsou tím na mysli veškeré hmoty, které jsou přímo navázány na součásti stavební konstrukce nebo jsou přímo spojené s provozem staveniště. Většina těchto hmot jsou známé již po mnoho staletí pod pojmem tradiční hmoty, dále pak na základě nových poznatků vědy a techniky vznikly hmoty nové. Pod pojmem tradiční hmoty si lze představit převážně hmoty z přírodních materiálů, jako jsou například kamenné nebo dřevěné výrobky, v pozdějších dobách také uměle vyrobené výrobky cihlářské, které se nejčastěji spojovali mechanicky nebo za pomoci malty. (Jungmann a kol., 2019)

V průběhu 19. století se spektrum používaných stavebních hmot radikálně zvýšilo. Přispěl tomu velký pokrok vědních a technických disciplín. Mezi nově používané hmoty patřily například litina, ocel, beton a železobeton. Během 20. století a na začátku 21. století se zvýšili nároky na ekologickou zátěž životního prostředí a s tím spojené hledání nových druhů stavebních materiálů. Klade se větší důraz na ekonomickou dostupnost materiálů a jejich opětovné použití při výrobě nebo další stavební činnosti. Zde se dostává se popředí pojem recyklace. Mezi nově používanými materiály v průběhu 20. století mají velký podíl tzv. kompozitní materiály. Mezi kompozitní materiály můžeme zařadit sádrokarton, dřevotřísku, beton a sklolaminát. (Kolář, Reiterman, 2012; Jungmann a kol., 2019)

Každý stavební materiál má své určité základní vlastnosti, podle kterých se nadále s materiálem pracuje. Stavební materiál je zkoumán z mnoha pohledů podle uspořádání vnitřní struktury materiálu a jeho vlastností. Mezi ty nejzákladnější patří vlhkost, zrnitost, hutnost pórovitost, měrná a objemová hmotnost. Z hlediska navrhování staveb a zařazení příslušného materiálu do výroby je třeba sledovat i další parametry. Mezi tyto parametry řadíme technické vlastnosti materiálů (pružnost a pevnost), hygienické, izolační, chemické, tepelné, biologické, vlhkostní a celou škálu dalších. (Kolář, Reiterman, 2012; Jungmann a kol., 2019)

2.2 Rozdělení stavebních materiálů

Stavební materiály lze rozdělit podle určitých parametrů a vlastností. Tím nejzákladnějším je rozdělení dle původu materiálu na přírodní a umělé. Přírodní materiály nadále rozdělujeme na anorganické, kam patří například zemina nebo kamenivo. Další podskupinou jsou organické přírodní materiály, zde má největší zastoupení dřevo. Umělé materiály se vyrábějí ze specifických surovin. Sklo, kovy, cement, vápno a řada dalších lze zařadit pod pojem umělé anorganické materiály. Mezi umělé organické materiály patří, například izolační materiály a plasty. Sádrokarton a sklolaminát patří mezi materiály kombinované. (Liška, 2003)

Mezi další důležité vlastnosti, podle kterých lze stavební materiál rozdělit jsou konstrukční vlastnosti. Materiály využívané pro konstrukční účely vytvářejí svislou i vodorovnou nosnou konstrukci stavby. Vyznačují se převážně svými mechanickými vlastnostmi. Mezi ně patří pevnost v tahu, pevnost v tlaku a odolnost vůči statickým a dynamickým účinkům. Materiály používané pro výplně nosných konstrukcí přinášejí zkvalitnění i některých izolačních vlastností, například tepelných a zvukových. Narozdíl od konstrukčních materiálů se vyznačují zvýšenou pórovitostí, nižší objemovou hmotností a snížením mechanických a pevnostních vlastností. Izolační materiály zajišťují ochranu staveb proti působení nežádoucích vlivů okolního prostředí. Do této významné skupiny patří ochranné materiály omezující průnik radonu a chemických látek, dále materiály, které zajišťují tepelnou izolaci stavby a hydroizolační materiály chránící před nežádoucí vlhkostí. Mezi méně důležité vlastnosti, které nemají vliv na konstrukční ani izolační vlastnosti dané stavby, patří vlastnosti dekorační. (Liška, 2003)

Stavební kámen

Přírodní kámen patří mezi nejstarší používané stavební materiály díky své dostupnosti. Má přirozenou odolnost vůči atmosférickým vlivům, a proto je hojně využíván již celá tisíciletí. Velkou roli v odolnosti vůči těmto vlivům hraje typ použité horniny. V dnešní době nachází uplatnění především pro stavbu silnic a železnic, zdění, zpevňování svahů a menších základů pozemních staveb. (Chromková a kol., 2019; Čermák 2020)

Těžba se provádí vrtáním, štípáním bloků a různými typy odstřelování. V novodobé stavební činnosti a architektuře pomalu přichází o své konstrukční využití, ale pro své dekorativní vlastnosti je nenahraditelný. Díky svým fyzikálním vlastnostem má široké spektrum využití. Mezi tyto vlastnosti patří pevnostní poměry a velká hutnost sktruktury. Má také velkou odolnost vůči povětrnostním vlivům, činnosti organismů a ohni. Vytěžený kámen se zpracovává a upravuje podle toho, jak se s ním bude dál nakládat. Výrobky z lomové těžby se zanechávají v původní podobě nezpracované nebo hrubě opracované. Kamenické výrobky se upravují strojově nebo ručně poté, co jsou hrubě opracovány. Možnosti a technologie úpravy závisí především na složení použité horniny. (Kolář, Reiterman, 2012; Chromková a kol., 2019; Čermák 2020)

V oboru stavebnictví se kamenivo nejčastěji využívá jako plnivo v kombinaci s vhodnými typy pojiv do výroby betonů a malt. Primární funkcí kameniva v betonech a maltách je vytvoření pevné a odolné kostry, která vzniká vzájemným vyplněním mezer mezi jednotlivými surovinami ve výrobě. Vzájemným opřením a zaklíněním kameniva a pojiv jednotlivých zrn vzniká celistvá struktura. Kamenivo může být umělé i recyklované, ale ve většině případů se používá kamenivo vyrobené z přírodních surovin. Kamenivo by mělo odpovídat normě ČSN EN 933-1. Nachází své uplatnění i v silničním nebo železničním odvětví k výstavbě zhuťných podkladních vrstev. V železničním stavitelství se v běžné praxi využívá recyklace kameniva přímo v místě a jeho následné využití při rekonstrukci železniční tratě. Pokud se kamenivo nepoužije znovu v místě, kde bylo vytěženo, musí se s ním nakládat jako s odpadem. (ČSN 2009a; Chromková a kol., 2019; Čermák 2020)

Přírodní kamenivo se podle způsobu vytěžení a dalších úprav dělí na drcené a těžené. Kamenivo těžené je ledovcového původu nebo pochází z říčních naplavenin. Vzniká přirozeným rozpadem hornin, především při erozním působení vody. Značí se oblými tvary zrn, které jsou při pohybech ve vodních tocích přírodně opracovány na kamenivo použité pro dekorační účely. Tyto vlastnosti jsou typické pro zvětralé horniny. Drcené kamenivo má ostré hrany a drsné lomové plochy. Pro tuto skupinu kameniva je charakteristická nepravidelnost tvarů zrn. Ve stavebnictví se nejčastěji používá pro zhuťnění podkladních vrstev. Mezi umělé kamenivo lze zařadit odpady z průmyslové výroby, například ze strusky nebo z popílku. Mezi tyto odpady patří expandovaný perlit, popílkové sbalky a keramzit. Umělé kamenivo lze také získat

2021

tepelným nebo jiným zpevňovacím procesem z upravených hornin. (Kolář, Reiterman, 2012; Čermák, 2020)

Mikrostruktura stavebních materiálů výrazně ovlivňuje technické vlastnosti, jako je propustnost, pevnost a trvanlivost. K určení této mikrostruktury byly vyvinuty různé techniky, každá s vlastními omezeními. Účelem studií o betonu a přírodních stavebních kamenech bylo porovnat a zkombinovat data získaná rentgenovou počítačovou tomografií, absorpcí vody ve vakuu. Byly získány křivky distribuce velikosti pórů v rozmezí od 10 nm do 1 mm a výsledky celkové pórovitosti. (Cnudde at. al, 2009)

V poslední době se do popředí dostává recyklované kamenivo vznikající při demolicích stavebních konstrukcí všech druhů. Recyklované kamenivo slouží k výrobě stavebních materiálů, například drcený beton a cihly. Použití takto recyklovaného kameniva je podmíněno jeho správným zacházením při demolici, aby nedošlo ke kontaminaci jiným druhotným materiálem. Všechny typy recyklovaných materiálů včetně kameniva podléhají testováním pomocí laboratorních zkoušek, za účelem zjištění zdravotní nezávadnosti. Ve většině případů se odpadní kamenivo recykluje v místě a je využíváno na stejném místě, kde bylo odtěženo jako odpad, v tomto případě jsou legislativní podmínky pro zkoušení takových odpadů z hlediska hodnot mírnější, než kdybychom odpad chtěli použít na jiné stavbě. Podle objemové hmotnosti jednotlivých zrn se dělí na pórovité a hutné. Z pohledu velikosti zrn se kamenivo dělí na hrubé se zrny nad 4 mm a na jemné se zrny do 4 mm. Při recyklaci kameniva pomocí třídění a drcení vznikají jemné prachové částice, které jsou nežádoucí pro použití do výroby betonů. Takto jemný materiál může za určitých podmínek využít do výroby asfaltových směsí. Pomoci laboratorní zkoušek také zjišťujeme skladbu jednotlivých zrn kameniva v procentech. Tento údaj se vyhodnocuje pomocí granulometrie. Vyjadřuje se graficky pomocí zrnitostní křivky, která reprezentuje obsah jednotlivých zrn v dohodnuté velikosti kontrolních sít. (Kolář, Reiterman, 2012)

Keramické výrobky

Stavební keramika, dřevo a přírodní stavební kámen jsou stavební materiály, které historicky patří k těm nejčastěji používaným. Stavební keramika se vyrábí pomocí pálení hlíny. Z pohledu struktury lze keramiku definovat jako nekovový polykrystalický materiál, který v určitých případech může obsahovat skelnou fázi. Získává se z vhodných nerudných

surovin, po homogenizaci a zdrobnění se formuje do požadovaných tvarů a rozměrů. Za pomoci sušení a pálení vznikají keramické vazby. (Aujezdský, 2020)

Keramika se dělí podle použití a účelu na keramiku stavební, technickou, hutnickou a užitkovou. Stavební keramika reprezentuje širokou škálu stavebních výrobků, například krytiny, obklady a pálené cihly. Odpadní pálené cihly mají široké spektrum využití a lze je nadále recyklovat a využívat na povrchu nebo pod povrchem terénu. (Aujezdský, 2020)

Technická keramika obsahuje výrobky ze speciálních materiálů na bázi nitridů, oxidů, karbidů a boridů hliníku, křemíku a dalších kovů. Tyto materiály mají své využití ve větší míře mimo stavební činnosti. Využívají se v lékařství, kosmonautice, energetice, strojírenství, elektrotechnice a v mnoha dalších technických disciplínách. Hutnická keramika se díky svým žáruvzdorným vlastnostem využívá v hutnickém průmyslu. Mezi užitkovou keramiku lze zařadit ozdobné předměty a nádobí. (Kolář, Reiterman 2012; Aujezdský 2020)

Keramický střep prezentuje všechny vhodně významné technické vlastnosti keramických výrobků. Patří mezi ně nízká tepelná vodivost, nízká objemová hmotnost, vysoká pevnost v tlaku a vysoký elektrický odpor. (Kulovaná a kol., 2019; Kolář, Reiterman 2012)

Malty a betony ve stavebnictví

Malty a betony patří ve stavební činnosti k nejpoužívanějším kompozitním materiálům. Z obecného hlediska jsou tvořeny pojivem. Pojivo může být na bázi anorganické původu i organického. V případě hydraulicky vytvrzovaných pojiv je nedílnou součástí betonu záměsová voda. Malty se liší od betonu pouze velikostí horní frakce plniva, to bývá zpravidla 4 nebo 8 mm. V těchto případech lze hovořit o takzvaných jemnozrnných betonech. (Kolář, Reiterman, 2012; Syka, Hubáček, 2019)

Malty představují podobný kompozitní materiál jako beton, liší se však použitou horní frakci plniva, a především účelem použití. Malta je používána jako spojovací systém různých stavebních konstrukcí, lze je rozdělit podle použitého pojiva na malty cementové, vápenaté, kombinované a hliněné. Další rozdělení je na základě způsobu výroby. Malta může být průmyslově vyráběna ve formě suché či vlhké směsi, dávkování a mísení probíhá

ve výrobě. Malta, která může být připravená zčásti průmyslově, přímo na staveništi se přidávají další složky, například cement. Poslední skupinu tvoří staveništní malta, u které dávkování a míchání probíhá přímo na staveništi. Před dodávkou malty musí výrobce provést zkoušku základních vlastností. Pro suché malty je testováno maximální velikosti zrna a dávka pro míchání. Pro čerstvé malty je zkoušena objemová hmotnost, u zatvrdlých malt je kromě objemové hmotnosti zkoumána také pevnost v tlaku. Pro tenkovrstvé omítky se používají pojivové systémy obsahující i organická pojiva, nazývají se plastové omítky s pojivy. Do této skupiny patří omítky s pojivy disperzními, směsnými a rozpouštědlovými roztoky. (Chromková a kol., 2019; Janda, Zich, Daněk, 2019; Syka, Hubáček, 2019)

Typickým představitelem betonů je silikátový beton, u něhož jsou použity pojiva na bázi hydraulicky vytvrzovaných cementových pojiv. Tento druh betonu tvoří více než 60 % spotřeby veškerých stavebních hmot a počítá se s ním jako s hlavním stavivem ve 3. tisíciletí, zvláště pak s jeho speciálními druhy označovanými jako vysokohodnotné betony. Celková roční spotřeba betonu se již několik let udržuje na hodnotě okolo 6,5 miliard m³. Z energetického pohledu reprezentuje beton nejvýhodnější stavební materiál. (Kolář, Reiterman, 2012)

Podle výzkumu Akono et al. (2021) je cílem je podpořit víceúrovňové chápání jemného recyklovaného kameniva pomocí nových přístupů. Zkoumá vliv jemných recyklovaných betonových agregátů na strukturu silikátových betonů. Za tímto účelem představuje nový myšlenkový model jemného recyklovaného kameniva se čtyřmi úrovněmi strukturální hierarchie: nosník, malta, pojivo a úroveň gelu. Chování jemného recyklovaného kameniva a betonu z přírodního písku charakterizuje pomocí analytických metod, jako je rentgenová difrakce a skenovací elektronová mikroskopie, spolu s hloubkovými mechanickými testovacími metodami, jako je mikroindentace a nanoindentace. Mikromechanické modelování integrované se statistickými dekonvolučními metodami se používá ke kvantifikaci fázového rozdělení malty z přírodního písku a jemné recyklované betonové malty. Podle studie je zjištěno, že jemné recyklované kamenivo vykazuje vyšší objemový podíl hydrátů křemičitanu vápenatého. Jemné recyklované kamenivo vykazuje vyšší objemový podíl volně balených hydrátů křemičitanu vápenatého s nízkou hustotou ve srovnání s přírodním pískovým betonem.

Z obecného pohledu je pod pojmem beton na mysli umělé stavivo složené ze směsi drobného a hrubého kameniva, pojiva, vody a případně přísad a příměsí upravující jeho vlastnosti. Podle druhu použitého pojiva se získávají různé druhy betonu, například cementový beton, asfaltový beton, beton s molekulárním pojivem, vápenatý beton, sádrový beton a mnoho dalších. Z materiálového hlediska představují betony nepoužívanější kompozitní materiály tvořené zatvrdlým pojivem. Funkci plniva zastávají zrnité složky o různé granulaci, které jsou získávány převážně z přírodních hornin nebo složky vláknité na bázi kovů, keramiky a plastů. Ve většině případů se po pojmem beton rozumí beton cementový, jehož pojivem je silikátový cement, který je vzhledem k nízkým výrobním nákladům nepoužívanější. (Kolář, Reiterman, 2012; Janda, Zich, Daněk, 2019)

Beton zastává funkci zdiva nosného i výplňového, kdy dochází ke zpevnění hrubého kusovitého kameniva maltou tvořenou pojivem a jemným kamenivem. Podle používaných složek se beton nejčastěji rozděluje na prostý beton, železový beton, předpjatý beton a vlákno beton. Výsledné vlastnosti betonu se dají předpovídat jen s určitou pravděpodobností, mají takzvaný statistický charakter daný velkým počtem nezávislých proměnných vstupních parametrů, kterých může být i více než dvacet. Některé z nich jsou vyjádřeny navíc ještě časovou závislostí, což se týká hlavně cementového kamene, který sám o sobě není z mikroskopického hlediska homogenním materiálem. Seskupení různě velikých zrn je též náhodným jevem, je dáno přesností dávkování jednotlivých složek při výrobě, vlastní zpracování a ukládání probíhá taktéž v jistých tolerancích. (Kolář, Reiterman, 2012; Janda, Zich, Daněk, 2019; Syka, Hubáček, 2019).

Komplikovaným článkem ve výsledném betonovém kompozitu je vedle rozhraní jednotlivých fází především pórovitá struktura cementového kamene, který je kapilárně pórovitou látkou, v níž jsou obsaženy póry způsobené převážně záměsovou vodou nebo vzduchem zavlečeným při zpracování betonové směsi, který nebyl při zhutňování vytěsněn. V důsledku se vyšší hodnota pórovitosti projeví vždy negativně na snížení trvanlivosti v důsledku zvýšené možnosti průniku agresivního prostředí plynů a kapalin podle způsobu uložení betonu. Beton se dá rozdělovat podle různých hledisek, například podle druhu složek, objemové hmotnosti, podle technologie výroby a podle funkce v konstrukci. Rozdělení podle objemové hmotnosti se vztahuje na suchý stav, dělí se na lehký beton s objemovou hmotností menší než $2\,000\text{ kg/m}^3$, obyčejný beton s objemovou hmotností $2\,000$ až $2\,800\text{ kg/m}^3$, těžký beton s objemovou hmotností větší

než 2 800 kg/m³. Pro úplnost se můžeme ještě setkat s lehkými betony pod označením pórobeton, který se vyrábí pouze průmyslově zvláštní technologií vytvrzováním v autoklávu a také s pojmem mezerovitý beton vyrábějící se pouze z úzké frakce kameniva bez přítomnosti písku. (Kolář, Reiterman, 2012; Stryk a kol., 2019)

Beton lze dělit podle způsobu a místa uložení na prefabrikovaný a monolitický. Pro prefabrikovaný beton je typické, že se vyrábí ve stálých výrobnách a je montován v místě užití. Monolitický beton je ukládán do bednění po procesu ztuhnutí. Ošetřuje se v průběhu tvrdnutí a tuhnutí a po odbednění zastává svou funkci. Tento typ betonu je používán při betonážích svépomocí. Skládá se z konstrukce vyrobené z jednoho kusu a většinou má v sobě dilatační a pracovní spáry. (Ebeton, 2019)

Rozdělení betonu podle pevnostních charakteristik má svou pevně zakotvenou tradici. V našich zemích se třídy betonu označovaly zkratkou B a číselnou hodnotou tlakové pevnosti v kg/cm². Od roku 2001 jsou druhy betonu u nás stanoveny zavedenou evropskou normou ČSN EN 206-1 - Beton. Vlastnosti, výroba, ukládání a kontrola shody. Podle této normy je beton definován jako stavivo složené z cementu, hrubého, jemného kameniva a vody, zatvrdlé reakcí cementu s vodou a může obsahovat povolené dávky přísad a příměsí. Tato rozsáhlá evropská norma obsahuje vedle vymezení základních pojmů pro beton, jeho výrobu, dopravu a ukládání i závazná pravidla pro jeho zkoušení jak v dohodnutém termínu 28 dní, tak i pro posuzování jeho dlouhodobé trvanlivosti. Tato norma též uvádí doporučené mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu v závislosti na stupni agresivity prostředí (ČSN, 2018). Třídy pevnosti jsou určeny poměrem válcové a krychelné charakteristické pevnosti v tlaku po 28 dnech tuhnutí a tvrdnutí. (Janda, Zich, Daněk, 2019; Stryk a kol., 2019)

Vedle obyčejného betonu, který má pevnost v tlaku do 60 MPa, se vyskytují různé druhy vysokopevnostních betonů s pevností 60 až 90 MPa. Vyskytuje se i beton vysokopevnostní s pevností tlaku nad 90 MPa. V současné době již beton není původním tříložkovým skládající se z vody, cementu a kameniva. Díky pokroku v chemii přísad a příměsí lze pozorovat nebývalý rozmach speciálních betonů s předem naprogramovanými parametry, a to jak ve fázi přípravy čerstvého betonu, tak v rychlosti vývinu a dosažení konečných mechanických a dalších užitných vlastností. (Kolář, Reiterman 2012; Janda, Zich, Daněk, 2019)

Pod pojmem beton se dnes označuje také celá řada kompozitních materiálů s cementovou maticí, u nichž však chybí hrubé složky kameniva. Jedná se tedy víceméně o jemnozrnné malty, velmi často za přítomnosti nových typů přísad a minerálních mikroplniv a v případě různých druhů a tvarů vláknité výztuže. Výsledný beton se vyznačuje extrémně nízkou pórovitostí, který dosahuje vysoké pevnosti v tlaku od 150 do 200 MPa, za přítomnosti vhodného typu a dávky vláknité výztuže je možno dosahovat i vysokých pevností v ohybu od 15 do 50 MPa. Takto získaný kompozit vykazuje i extrémní odolnosti vůči různým druhům agresivního prostředí a povětrnostním vlivům. (Kolář, Reiterman, 2012)

Na našem území dosáhla betonářská praxe díky tomuto rychlému rozvoji nových betonářských technologií značného pokroku. Příkladem jsou takzvané samozhutnitelné betony, které se vyznačují velkou pohyblivostí čerstvě vyrobené směsi obsahující super plastifikační přísadu nové generace a vhodné mikroplniva. Tento druh betonu nevyžaduje žádné zhutňování, ukládá se jednoduše jako samonivelační hmota. Příprava tohoto druhu betonu vyžaduje přesné dávkování jednotlivých složek, účinné strojní míchání a přísnou technologickou opatrnost. Stěžejním momentem pro výrobu kvalitního betonu jak v čerstvém, tak i zatvrdlém stavu je volba dávek jednotlivých složek. Vlastnosti složek a jejich podíly v betonu rozhodují o jeho vlastnostech. Technické postupy návrhu složení betonu nelze vnímat jen z pozice snadné dostupnosti jeho základních složek, ale převážně s opatrností na jejich chování po vzájemném smíšení při zpracování. Poměr jednotlivých složek se při prvním návrhu betonu musí odrážet od požadované pevnosti betonu, od třídy cementu, od druhu a zrnitosti kameniva. Dále závisí na způsobu zpracování čerstvého betonu a řadě dalších proměnných. Rozdíl mezi kvalitním a nekvalitním betonem nevychází ani tak ve výběru složek, ale spíše v tom, v jakém poměru jsou tyto složky smíchány, jaká pečlivost je věnována ukládání, zhutňování a ošetřování po jeho odformování nebo odbednění. Metody teoretického návrhu složení betonu vycházejí převážně ze dvou základních podmínek. První podmínka představuje využití známé závislosti krychelné pevnosti betonu na kvalitě cementu, na jeho množství v záměsi, na vodním součiniteli, na druhu a skladbě kameniva, na zpracovatelnosti betonové směsi, na způsobu zpracování, zhutňování a ošetřování betonu. Druhou podmínkou pro optimální návrh betonu je, že směs cementu a vody obalí všechna zrna kameniva a vyplní všechny mezery mezi zrny tenkou stejnoměrnou vrstvičkou tmelu cementové kaše. Existuje známý

2021

vztah mezi potřebnou dávkou záměsové vody a požadovanou zpracovatelností čerstvého betonu pro daný druh a dávku kameniva. Potřebné množství cementové kaše se stanoví experimentálně změřením mezerovitosti použité skladby kameniva a výpočtem jeho celkového povrchu. Přesné dodržení této druhé podmínky znamená nejen ekonomičtější návrh betonu, ale i optimální množství zatvrdlého cementu s minimálními objemovými změnami. (Kolář, Reiterman, 2012; Syka, Hubáček, 2019)

Mechanické vlastnosti betonu

Beton je kompozitní látkou, u níž jsou její vlastnosti určeny nejen vlastnostmi a objemovým podílem kameniva a cementovým kamenem, ale i vlastnostmi rozhraní mezi nimi. U vyztužených betonů k tomu přistupuje též soudružnost použité výztuže z betonu, konkrétně soudružnost výztuže se zatvrdlým cementovým kamenem. Největší a konečný vliv na vlastnosti betonu má cementový kámen, zejména jeho pórová struktura a mikro-mechanické jevy, které probíhají během vytvrzovacího procesu hydratací. Hydratace cementové kamene je provázena objemovými změnami a vznikem trhlinek ve velikosti mikro. Tyto přeměny jsou nejlépe pozorovatelnými v raném stáří betonu. Rychlost materiálových změn je významně ovlivněna okolním prostředím. Mezi tyto aspekty patří vlivy atmosféry, zeminy, podzemní vody, slunce, deště a dalších. Se zvyšující se agresivitou prostředí, ve kterém se beton nachází, se zrychluje degradační proces betonu. (Kolář, Reiterman, 2012; Syka, Hubáček, 2019; Stryk a kol., 2019)

Výzkum podle Shewalula (2021) představuje experimentální zjištění mechanických vlastností betonu s odpadním ocelovým šrotem. Recyklace kovového šrotu jako betonové základové výztuže vylučuje problém s likvidací. Laboratorní zkoušky pevnosti v tlaku a meze pevnosti v tahu byly provedeny pro různá procenta odpadního ocelového šrotu (0 %, 0,5 %, 0,75 % a 1,5 %) stanovená objemem betonu. Chování při kompresi bylo získáno pomocí jednoosých kompresních testů, zatímco chování v tahu bylo získáno pomocí testů rozdělování tahem. Laboratorní testování 12 kubických vzorků a 12 válcových vzorků bylo provedeno 28. den vytvrzování. Po přidání odpadního ocelového šrotu bylo ve výsledcích zkoušky zjištěno, že pevnost v tlaku se zvýšila o 26,8 % u 0,5 %, o 30,7 % u 0,75 % a snížila se o 5,3 % u 1,5 % objemových betonu. Pevnost v tahu se zvýšila o 11,2 % u 0,5 %, 5,8 % u 0,75 % a 2,5 % u 1,5 % objemových betonu. Výsledky testu ukázaly, že modul pružnosti a maximální pnutí obsahuje

pozoruhodný přírůstek se zvýšením objemu odpadního ocelového šrotu. Ve srovnání s prostým betonem se zlepšily pevnostní vlastnosti betonu s ocelovým šrotem, avšak se zvýšeným množstvím odpadního šrotu se snížila zpracovatelnost betonu.

Pevnost betonu vyplývající z jeho složení je dána vlastnostmi dvou jeho součástí v zatvrdlém stavu. První část tvoří pevnost samotného cementového kamene vznikající hydratací. Druhá část zahrnuje pevnost a soudružnost kameniva s již zmíněným vzniklým cementovým kamenem. Obě tyto části mají různé fyzikální vlastnosti, které při vzájemném propojení v zatvrdlém betonu způsobují vznik různých vnitřních napětí. Tyto napětí poté ovlivňují, jak časový průběh nárůstu mechanických vlastností, tak i hodnotu výsledného mezního napětí neboli pevnost. Beton je materiál poměrně houževnatý, avšak jeho slabou stránkou je malá pevnost v tahu, ta je oproti tlakové pevnosti zhruba desetinová. Tato skutečnost s sebou nese nutnost beton vyztužovat. Vyztužování betonů probíhá buď prutovou výztuží, sítěmi, nebo výztuží rozptýlenou v podobně polymerních vláken či kovových drátků. Pro posouzení vlivů dávky záměsové vody, jež je hlavním zdrojem pro vznik konečné pórovitosti, lze využít graf závislosti pevnosti v tlaku na pórovitosti. Vodní součinitel má vliv na celou řadu dalších vlastností a jevů, se kterými se lze u betonu setkat. Jedním z nich jsou i objemové změny betonu, převážně se jedná o smrštění. Pro úplnou hydrataci cementu je potřeba přibližně 25 l vody na 100 kg cementu. Běžně vyráběné betony však mají tyto hodnoty nižší. To znamená, že část vody, která se nespoteřebuje na hydrataci, se postupně odpařuje, čímž dochází ke zmenšení objemu. Tento proces je doprovázen vznikem trhlinek a zvýšením otevřené pórovitosti. (Kolář, Reiterman, 2012; Syka, Hubáček, 2019)

Trvanlivost betonu lze vnímat jako jeho schopnost odolávat proti působení vlivů vnějších činitelů, ale může být také ovlivněna i vnitřními činiteli. K vnitřním činitelům patří stavba a struktura materiálu, jeho chemicko-fyzikální vlastnosti, mineralogické a chemické složení a jejich vnitřní proměna v průběhu času. Obvykle se trvanlivostí betonů rozumí časový úsek, během kterého projevy vnějších a vnitřních činitelů nezpůsobí degradaci jeho vlastností. Tato degradace může vést k ohrožení jeho funkce ve stavebních konstrukcích. Ve smyslu trvanlivosti betonu lze často hovořit i o jeho životnosti. Mezi nejpodstatnější vlivy, které působí z vnějšku lze zařadit působení vody a střídání teplot a vlhkosti. Nejen vlivy fyzikálního charakteru mají vliv na trvanlivost betonu. Mezi chemické vlivy patří působení plynů, par a agresivních vod. Neméně důležitými vlivy jsou

biologické vlivy, jako jsou například působení hmyzu, hub, plísní a podobných organismů. Jedním z nejvýraznějších škodlivých vnějších vlivů je střídající se účinek mrazivého klimatu, které mění objem mrznoucí vody v pórovém systému betonu. Způsobuje tlaky ve vnitřní struktuře pórovitých stěn a tím namáhá beton tahem. Hodnota působená v tahu je zhruba desetinásobně nižší než působení v tlaku. U betonů s větší nasákavostí, probíhá tento proces ve větší míře. (Janda, Zich, Daněk, 2019; Stryk a kol., 2019)

Železobeton

Prostý beton je poměrně křehký materiál, který je náchylný k vytváření trhlin i bez působení vnějšího zatěžování. Ideálním použitím pro tento druh betonu je výroba prvků, které mají menší rozměry, například betonové prefabrikáty. Už od počátku rozvoje technologie výroby betonu ve 2. polovině 19. století se uvažovalo, jak eliminovat nežádoucí poměr tahové a tlakové pevnosti betonu. Řešením je použití vhodného typu vyztužení betonu pomocí ocelových prutů. Využití této technologie vychází ze vzájemné soudružnosti povrchu oceli se zatvrdlým cementovým tmelem, blízkých hodnot tepelné roztažnosti a pasivace povrchu oceli v alkalickém prostředí zatvrdlého betonu. Své uplatnění nachází železobeton zejména v mostním stavitelství a v konstrukcích o velkých rozpětích. Mezi hlavní výhody použití železobetonu patří velká úspora materiálu ve smyslu zeštíhlení betonových konstrukcí. U konstrukcí, které jsou silně namáhány smykem a ohybem se vyplatí použití předpjatého betonu. Princip předpjatého betonu spočívá ve vnesení tlakového přepětí, která tak v případě ohybem namáhaných prvků vytváří ohybovou rezervu a snižuje tvorbu trhlin. Statika je samostatný technický obor, který se věnuje návrhu předpjatých a železobetonových konstrukcí. Při navrhování je důležitým faktorem zajištění dostatečné ochrany oceli vůči požáru, korozi a podobným nežádoucím vlivům. (Janda, Zich, Daněk, 2019; Stryk a kol., 2019)

Speciální betony

Do této skupiny patří převážně betony, které se vyznačují různými specifickými vlastnostmi oproti běžným betonům. Patří sem například betony, které mají garantovanou vodotěsnost používané ve vodohospodářských stavbách. Mezi speciální betony patří i betony s neobvyklou objemovou hmotností a mimořádnou pevností. Dále do této skupiny lze zařadit cementové potěry, betony s rozptýlenou výztuží a betony s necementovým pojivem. Mezi betony s rozptýlenou výztuží patří především vláknobetony a drátkobetony.

Z pohledu specifického ukládání patří do skupiny speciálních stříkané betony, které se používají převážně v podzemním a dopravním stavitelství. Navrhování složení takových druhů betonů je podmíněno finální tloušťce konstrukce a stroji, který postřik provádí. Příměsi typické pro tento druh betonu se přidávají až přímo ve stříkací pistoli, ve které se rovněž aplikuje i urychlovač tuhnutí. V posledních letech se do popředí dostává takzvaný samozhutnitelný beton. Jedná se o velmi tekutý beton, který slouží pro betonáže masivně vyztužených konstrukcí nebo prvků, kde není možné klasické zhutňování. Pro odolání extrémním teplotám se používají žárobetony, které dokážou odolávat teplotám až 1 800 °C. Tento typ betonu je vyráběn z hlinitanového cementu a vhodného kameniva, převážně se jedná o čedič a šamot. Uplatnění nacházejí převážně v těžkém průmyslu a speciálních konstrukcích. (Kolář, Reiterman 2012; Stryk a kol., 2019)

Živice

Živici lze zařadit do třídy hornin, které jsou organogenního původu. Tyto horniny vznikaly rozkladem bílkovin a tuků mořských organismů za neúplného přístupu vzduchu. Živice se rozděluje na přírodní asfalty, dehty a umělé. Jedná se o směs uhlovodíků s rozdílnou molekulovou hmotností a složením. V oboru stavebnictví mají primární využití jako pojiva využívané za horka pro výrobu asfaltových betonů. Dalším využitím je jako základ pro výrobu výrobků a materiálů pro hydroizolační účely, ochranných nátěrů a výrobu laků. Za běžných teplot jsou asfalty tuhé nebo polotekuté. U živic dochází k trvalé deformaci příčinou mechanického namáhání. Vlastnosti jsou ovlivňovány nejen dobou zatěžování, ale i teplotou. Působením vyšších teplot se stávají tekutými. Při nižších teplotách naopak křehnou. Ve stavebnictví jsou nejčastěji využívány asfalty a dehty, ale význam asfaltů je v dnešní době značně převažující. (Beňo, 2011; Tomek, Vávrová, 2014)

Asfalty mohou být přírodního původu nebo jsou vyráběny dnes převážně z ropy. Do skupiny asfaltů patří asfalty umělé, petrolejové a ropné. Jejich využití se datuje až do starověku v místech přírodních nalezišť. Mezi nejvýznamnější naleziště patří oblast Kaspického jezera, říše Inků a Blízký a Střední východ. V raném počátku využívání asfaltů sloužily jako izolační materiál proti vodě, spojovací tmel pro zdiva a při povrchové úpravě cest. V období středověku se s využitím asfaltů příliš nepočítalo. Jeho masové využívání přišlo až s počátkem průmyslové revoluce v 18. století. Značný rozkvět nastal až v polovině 19. století, kdy asfalt nacházel uplatnění ve stavbě cest a chodníků. V dnešní době

tvoří nezastupitelnou složku pro účely silničního stavitelství a hydroizolační technologie. (Beňo, 2011)

Asfalt je směs řady sloučenin většinou uhlovodíkového charakteru a poměrně vysokém podílu dalších látek, jako jsou sloučeniny kyslíku, dusíku a síry. Mezi uhlovodíky, které mohou být přítomny v asfaltech, jsou parafíny, aromáty, cykloparafíny a olefiny. Podle složení uhlovodíků lze asfalty rozdělit na malteny a asfalteny. Malteny jsou látky olejovitého až pryskyřičného typu vytvářející prostředí, v němž jsou molekuly asfaltenů rozptýleny. Jsou šířiteli lepivých a plastických vlastností asfaltů. Asfalteny jsou křehké látky složené z kondenzovaných aromatických uhlovodíků. Jsou považovány za nositele tvrdosti asfaltu. (Beňo, 2011; Kolář, Reiterman, 2012; Tomek, Vávrová, 2014)

Ve vodním prostředí je asfalt nerozpustný, nenadouvá se, je schopen přijímat stopové množství vody pouze na povrchu. Ve vztahu k vodě se chová obdobně jako plasty a kaučuky, z tohoto důvodu ho lze využít jako izolační materiál proti vodě. Hustota asfaltu se pohybuje v rozmezí od 980 do 1 100 kg/m³. Asfalt je odolný vůči mrazu, ale za nižších teplot je křehký. Při teplotách nižších než -18 °C ztrácí přilnavost k plastům. (Beňo, 2011)

Asfalty jsou imunní proti působení polárních chemických látek. Mezi tyto chemické látky lze zařadit posypové hmoty, louhy, anorganické soli a nízké koncentrace kyselin. Dusičná kyselina asfalt částečně narušuje oxidací. Kyselina solná nevzbuzuje důležité změny, které by mohly narušit izolační schopnosti asfaltů. Měkčí asfalty mají nižší odolnost při působení vyšších teplot. Asfalt je schopen se rozpouštět v organických rozpouštědlech. Rozpouštění asfaltů je využíváno při výrobě nátěrových hmot a asfaltových laků. Mezi rozpouštědla lze zařadit například benzen, sirouhlík a benzin. Asfalt se vyznačuje vysokou výhřevností a hořlavostí. V asfaltech se vzhledem k požární bezpečnosti vyskytují těkavé látky jen velmi zřídka. Větší obsah těkavých látek je naopak přítomno v používaných ředidlech. Vliv ultrafialového záření a přítomnost kyslíku zapříčiňuje, že asfalty křehnou a tvrdnou. (Beňo, 2011; Wen, 2021)

Přírodní asfalty lze nalézt na několika místech naší planety. Mezi nejvýznamnější z hlediska objemu patří Kuba, Bermudy, Trinidad, USA a Albánie. Přírodní asfalty se eventuálně dají získat tavením hornin nebo zemin, které zahrnují asfalt. Horniny, které se vyznačují nízkým obsahem vlastního asfaltu a vysokým obsahem minerálních látek, lze nazvat horniny asfaltové. Tento typ získaného přírodního asfaltu lze označit asfaltit.

Vyznačuje se vyšší tvrdostí a nižším obsahem příměsí minerálního charakteru. Asfalty s těmito vlastnostmi lze nejlépe využít převážně v oboru silničního stavitelství. Drtivá většina asfaltů využívaných v dnešní době patří do skupiny ropných asfaltů. Zastoupení přírodních asfaltů na trhu výrazně klesá. (Tomek, Vávrová, 2014; Hýzl, 2019)

Ropné asfalty lze získat z destilace ropy frakční metodou. Jedná se o zůstatkový podíl z této metody. Dílčí druhy ropy se mohou lišit dle obsahu benzinových frakcí. Mezi lehké ropy patří ty, které se vyznačují velkým množstvím benzinových frakcí. Těžké ropy na rozdíl od lehkých mají větší podíl asfaltu a menší podíl benzínu. V našich výrobcích asfaltů se nejčastěji zpracovává parafinická ruská ropa. Pomocí destilace ropy za atmosférického tlaku se z původní suroviny odděluje benzin a oleje vroucí při teplotě do 360 °C. Zbytkovým podílem vzniklým z destilace je primární asfalt. Tento typ asfaltu je základem pro výrobu asfaltů modifikovaných, oxidovaných a ředěných, které mají největší význam v oboru stavebnictví. (Tomek, Vávrová, 2014; Hýzl, 2019; Wen, 2021)

Hlavní potenciál využití asfaltů v oboru stavebnictví je v silničním stavitelství a v hydroizolační technice. V silničním stavitelství se asfalt nachází v podobě postřiku, emulzí, asfaltových betonů a litých asfaltů. V hydroizolační technice lze najít uplatnění ve formě nátěrů a asfaltových pásů. Podstatné vlastnosti silničních asfaltů jsou dobrá přilnavost ke kamenivu, odolávání výkyvům teplot, stárnutí a bránění větší deformace silniční konstrukce. Pro využití asfaltů na silniční účely jsou nejčastěji uplatňovány polofoukané asfalty, ředěné asfalty a asfaltové emulze. Pro hutněné směsi, které jsou kladeny během ukládky, se využívají měkčí druhy silničních asfaltů. Pro nehutněné směsi se využívají převážně tvrdší druhy, například litý asfalt. V konstrukcích silniční vozovky asfalt slouží jako pojivo. Asfalt v této specifikaci spojuje minerální částice různé zrnitosti do celistvého celku. Zároveň brání povrch vozovky proti atmosférickým vlivům, umožňuje rovnoměrné rozdělení dopravní zátěže do podkladu a zabezpečuje povrch silniční komunikace před mechanickým porušením dopravou. (Beňo, 2011; Tomek, Vávrová, 2014; Hýzl, 2019)

Z měkčích primárních asfaltů a destilačních zbytků vznikají především oxidované asfalty. Tato metoda probíhá profoukáváním vzduchem při teplotách 250 až 300 °C. Během oxidačního dění nastávají ve struktuře asfaltu chemické změny, na vzdušný kyslík se nabalují atomy vodíku z řetězců, u nichž poté probíhá slučování. Při změnách chemického složení působí také změny ve fyzikálních vlastnostech asfaltů. Z tohoto

procesu vycházejí výrobky méně náchylně na teplotní změny. Na rozdíl od primárních asfaltů vzrůstá hodnota bodu měknutí na 80 až 100 °C. Výrobky se nejčastěji využívají v izolační technice a část z nich i v silničním stavitelství a nátěrových hmotách. V oblasti izolačních výrobků se tvrdý asfalt před procesem oxidace modifikuje přidáváním oleje. (Kolář, Reiterman, 2012; Tomek, Vávrová, 2014; Wen 2021)

Ředěné asfalty jsou odlišné od těch běžně používaných výrazně nižší viskozitou. Vznikají přidáním organických rozpouštědel v množství okolo 40 % hmotnosti do oxidovaných nebo primárních asfaltů. Výpary, které se uvolňují při působení rozpouštědel, nevhodně ovlivňují životní prostředí a zvyšují nebezpečí vzniku požáru. Z tohoto důvodu se dnešní době použití ředěných asfaltů výrazně snižuje. Dříve se používaly ve studených směsích, které byly určeny pro opravy komunikace v silničním stavitelství. (Beňo, 2011; Wen, 2021)

Přidáním přísady polymeru vznikají asfalty modifikované, které jsou úmyslně změněné, aby se vlastnosti upravily do požadovaných parametrů. Tento druh asfaltu můžeme zařadit do nových druhů kvalitních asfaltových výrobků. Primární surovinou pro výrobu je primární asfalt. Sekundární suroviny jsou vhodné elastomery a plastomery. Přidáním těchto látek se výrazně změní termoviskózní vlastnosti primárního asfaltu a získávají se materiály s podstatně lepšími uživatelskými vlastnostmi. V první řadě jsou tyto asfalty využívány v hydroizolační technice jako zálivky nebo pro výrobu izolačních pásů. Jejich využití lze uplatnit také v silničním stavitelství. (Tomek, Vávrová, 2014)

U modifikovaných asfaltů se navýší rozsah mezi bodem měknutí a bodem lámavosti, to znamená, že u těchto asfaltů se docílí větší škály plastické oblasti. Pokud neproběhne změna penetrace, mají modifikované asfalty nižší bod lámavosti a větší hodnotu modu měknutí. Rovněž asfalty, které jsou modifikovány elastomery, vykazují menší nebo větší pružné chování. Dochází k deformaci působením namáhání, ale po odtížení se vrátí do prvotního tvaru a polohy. Naopak pro oxidované asfalty je specifické pouze plastické chování. Pro modifikované asfalty je typická vyšší adheze, větší tažnost, nižší stékání a jsou více odolné proti stárnutí. Větší viskozita u těchto asfaltů způsobuje, že jsou obtížněji zpracovatelné a jejich správné použití vyžaduje přísnější dodržování technologický předpisů. Hlavní nevýhodou u modifikovaných asfaltů je jejich vyšší cena oproti ostatním druhům, ale vykazují zlepšené a trvalejší vlastnosti. Primární uplatnění

nacházejí v oblasti izolační techniky. Ostatní druhy asfaltů se využívají v silničním stavitelství. (Kolář, Reiterman, 2012; Tomek, Vávrová, 2014;)

Za účelem zlepšení nízkoteplotního výkonu asfaltu modifikovaného asfaltem představuje laboratorní studie podle Wena et al. (2021) vyhodnocení reologických vlastností asfaltových kompozitů modifikovaných asfaltů z hlediska stárnutí. Mechanické vlastnosti asfaltu, modifikovaného asfaltu a kompozitu modifikovaného asfaltu byly hodnoceny na základě penetrace, bodu měknutí a rotace zkoušky viskozity. Byly provedeny experimenty, včetně reometru ohybového paprsku, dynamického smykového reometru, vícenásobného vrstvení a zotavení, fluorescenčního mikroskopu a infračervené spektroskopie Fourierovy transformace, aby byly zkoumány reologické vlastnosti a mikrostruktura horninového asfaltového kompozitu modifikovaných asfaltů, stejně jako vliv modifikace polymeru a stárnutí na asfalty. Výsledky prokázaly, že modifikovaný asfalt vykazoval vyšší konzistenci, lepší deformační odolnost a teplotní citlivost než obyčejný asfalt. Nejvyšší kvality dosahoval asfalt obohacený o 5 % asfaltového kameniva a 18 % drcené gumy.

2.3 Vstupní primární suroviny ve výrobě betonů

Kamenivo

Kamenivo se vyznačuje jako sypký inertní materiál. Patří mezi ně drcený kámen, šterk a písek. Drcený kámen spolu s portlandským cementem jsou neodmyslitelnými složkami pro výrobu betonu. Aby bylo zachována požadovaná kvalita betonové směsi, musí být kamenivo čisté, pevné a tvrdé a nesmí obsahovat nánosy jílu a jiných jemných materiálů. (Mujbeton, 2020)

Používané kamenivo ve výrobě betonových směsí ve firmě HERKUL a.s. je dodáváno z kamenolomu Měrunice. Kamenolom je od firmy vzdálený 14 km. V tomto kamenolomu se nachází přírodní drcené kamenivo čedičového původu. V našem případě se využívá frakce 8 až 16 mm a 11 až 22 mm (viz Obrázek 1). Kamenivo se uplatňuje ve výrobě podle požadovaných vlastností na beton. Od dodavatele kameniva musí být dodáno prohlášení o vlastnostech a osvědčení o shodě řízení výroby. (Herkul, 2018)



Obrázek 1 - Kamenivo

Písek

Přírodní štěrk a písek je obvykle těžen v dolech, řekách a jezerech. Probíhá jeho umývání a následné roztřídění dle jednotlivých frakcí. Jedná se o přírodní těžené kamenivo. V našem případě je dodáván praný písek ve frakci 0 až 4 mm (viz Obrázek 2) a štěrkopísek ve frakci 4 až 8 mm. Betonové směsi obsahující pouze praný písek lze označit jako maltoviny či cementové potěry. Směsi obsahující štěrkopísek jsou obvykle využívány při betonování podlah. Stejně jako u kameniva je od dodavatelů požadováno prohlášení o vlastnostech a osvědčení o shodě řízení výroby. V těchto dokumentech se nachází například petrografický popis kameniva či zrnitostní rozbor. (Herkul, 2018)



Obrázek 2 - Písek

Cement

Stavební průmysl spotřebovává velké množství přírodních zdrojů a energie. Je to jeden z hlavních zdrojů produkce odpadu a emisí skleníkových plynů. Příprava a využití betonu mají velký dopad na změnu klimatu a znečištění životního prostředí. Hodnocení vlivu betonu na životní prostředí má mimořádný význam z hlediska dosažení udržitelné společnosti. Cement je běžně používaný spojovací materiál pro přípravu betonu. Výroba a využití cementu v betonu jsou hlavní odpovědné za emise skleníkových plynů a změnu klimatu. V tomto výzkumu je za účelem měření vlivu betonu na životní prostředí připraven model hodnocení životního cyklu. Beton se připravuje se třemi různými kategoriemi pojivových materiálů, jako je portlandský cement, mletá granulovaná vysokopecní struska a portlandský puzolánový cement. Na betonárně HERKUL a.s. je používán portlandský cement s označením CEM I 42,5 R. Jelikož jde o chemickou látku je od dodavatele požadován bezpečnostní list, prohlášení o vlastnostech a certifikát o stálosti vlastností. (Herkul, 2018; Manjunatha at. al, 2021)

Chemické přísady

Tyto přípravky tvoří rozsáhlou škálu přísad a příměsí pro výrobu betonů a malt k úpravě jejich vlastností nejen při výrobě, ale i k dosažení potřebných vlastností pro vytvrzení. Dnešní technologie výroby betonu se již bez použití těchto látek prakticky neobejde, tvoří nedílnou součást původního složení silikátového kompozitu. Jejich užití je po celém světě velmi rozšířené, zkušenosti s jejich aplikací jsou známy již několik desetiletí. V celé řadě případů se používají příměsí různých typů, mezi ně patří příměsí ve formě minerálních mikroplniv. Původní tříložkový beton je rozšířen o minoritní složky ve formě nejrůznějších chemických přísad a práškovitých příměsí na minerální bázi. Jsou tím významně posunuty možnosti přípravy betonů s nadstandartními vlastnostmi, tyto betony se nazývají vysokohodnotné. Jejich základním předpokladem je vhodná aplikace vybraných typů chemických přísad a příměsí. Pro volbu těchto přísad je nutno dodržovat jejich složení a účinky na vytvrzovací procesy použitého druhu cementu. (Hlůžek, Nežerka, 2019)

Pro klasifikaci druhů a rozlišení mezi sebou je v technologii výroby betonů zavedeno hledisko jejich poměrné dávky vůči cementu. Z chemického pohledu jsou příměsí a přísady různé typy sloučenin i směsi látek. Může se jednat o látky organické

i anorganické povahy. Jako přísady se označují většinou kapalné látky, které se přidávají v malém množství ve vztahu k hmotnosti cementu před nebo během míchání čerstvého betonu nebo dodatečného míchání, jejichž pomocí lze dosáhnout požadované úpravy běžných vlastností betonu. Dávka těchto látek nepřevyšuje 5 % hmotnosti cementu. Chemické přísady se běžně vyskytují v kapalně formě, většinou se jedná o různě koncentrované roztoky účinných látek. Menší množství přísad je vhodné předem rozpustit v části záměsové vody z důvodu snadnější adaptace při homogenizaci v čerstvém betonu. Písady lze rozdělit dle funkce a četnosti používání na přísady plastifikační, regulátory tuhnutí a tvrdnutí, přísady provzdušňovací umožňující tvorbu pórů pro zlepšení mrazuvzdornosti, přísady pěnотvorné pro výrobu pórobetonu, přísady pro výrobu těsnících a výplňových hmot, přísady pro zlepšení vodotěsnosti betonu a ostatní přísady. Ostatní přísady mají funkci stabilizační, rozpínavou, těsnící, biocidní a odolnosti vůči korozi. (Kolář, Reiterman, 2012; Hlůžek, Nežerka, 2019)

Pojiva

Do skupiny pojiv lze zařadit anorganické nebo organické látky. Tyto látky jsou schopné sloučit vložené kusové hmoty a vytvořit z nich homogenní pevný celek. Ve většině případů je proces spojování provázen chemickou reakcí, v ostatních případech se jedná pouze o mechanické pojivé schopnosti. Mezi mechanická pojiva patří hlíny, pájky, dehty, lepidla a asfalty. U těchto procesů nedochází ke změně jejich chemického složení. Mezi pojivá chemická, u kterých při procesu spojování dochází ke změně chemické stránky, se řadí cement, sádra a vápno. Vyjmenovaná chemická pojiva se nejčastěji používají spojováním za studena. Mezi pojiva využívající tepelné zpracování lze řadit pájky, dehet a asfalty. Podle chemického složení se pojiva rozdělují na organická a anorganická. (Kolář, Reiterman, 2012; Stryk a kol., 2019)

Obyčejná portlandská cementová a vápenná tradiční pojiva mají díky své vysoké alkalické povaze špatnou kompatibilitu s bioagregáty. Výsledkem je, že vyrobené biobetonu vykazují prodlouženou dobu tuhnutí, špatné mechanické a trvanlivé vlastnosti. Aby bylo možné při přípravě biobetonu použít tradiční pojiva, stává se nevyhnutelným použití nákladných metod ošetření ke zlepšení biologické snášenlivosti těchto pojiv. (Syka, Hubáček, 2019)

Z pohledu stavební činnosti jsou nejrozšířenější anorganická pojiva práškovité hmoty. Tyto hmoty ve spojení s vodou po určité době tvrdou, tuhnou a trvale spojují kusové stavební hmoty. Anorganická pojiva označujeme jako maltoviny. Maltoviny se vyrábějí pálením přírodních surovin. Maltoviny lze rozdělit na hydraulické, vzdušné a zvláštní. Pro hydraulické maltoviny je typické, že vyhotovené výrobky z nich dobře tvrdnou a jsou stále při uložení na vzduchu. (Syka, Hubáček, 2019).

2.4 Vstupní primární suroviny ve výrobě asfaltových směsí

Kamenivo

Kamenivo je tříděno dle velikosti zrna (frakce). Je skladováno na deponiích sypkého materiálu, umístěných na zpevněném podloží, v oddělených zastřešených boxech, označených čísly frakcí. Průběžně je doplňováno přímo do boxů nákladními automobily. Čelním kolovým nakladačem je kamenivo dopravováno do základních dávkovačů, v tomto případě řadového šestikomorového zásobníku. V závislosti na receptuře je kamenivo odebíráno dávkovacím pásem základních dávkovačů a přepravováno na sběrný pás, dále se směs odebraného kameniva transportuje přes odlučovač nadzrna podávacím (zavážecím) pásem do vysoušecího bubnu. Dále pokračuje transport kameniva přes tzv. horké třídění, kde se na sítích vytřídí zrna nechtěné velikosti.

Asfaltový granulát

Asfaltovým granulátem (recyklátem) se rozumí vyztužený asfalt získaný frézováním nebo drolením s následným drcením. Asfaltový granulát (recyklát) je skladován na deponiích ve vyhrazených boxech obalovny. Čelním kolovým nakladačem je dopravován do zásobních násypků na recyklát, odkud je přepravním pásem dopravován do otvoru pro vsázku recyklátu do vysoušecího válce, opatřeného škrticí klapkou řízenou pneumatickým válcem, nebo korečkovým elevátorem do násypky u míchačky, odkud je dávkován do hnětacího stroje (míchačky) za studena. Asfaltový granulát (recyklát) může být používán i k jiným stavebním úpravám.

Asfalt

Asfalt je skladován v nových zásobnících. Asfalty jsou roztoky silničních a oxidovaných asfaltů v minerálních, popř. rostlinných olejích. Jednotlivé druhy se liší druhem a množstvím použitého asfaltu a rozpouštědla. Rozpouštědlo nebo fluxovadlo snižuje viskozitu asfaltu tak, aby při mírně zvýšené teplotě bylo pojivo dobře aplikovatelné

při údržbě asfaltových vozovek. Veškeré rozvody asfaltu jsou provedeny jako dvouplášťové a jsou podtápěné termálním olejem v případě potřeby elektricky. Hlídání a měření hladiny je provedeno pomocí kontinuálního měřicího systému tlakovou sondou Vega. Asfalt je plněn do vyhřívaných skladovacích nádrží speciálními cisternami dodavatele. Na pracovní teplotu je zahříván elektrickými přímotopnými spirálami. Dle receptury je pomocí čerpadla a dávkovacího zařízení přidáván do hnětacího stroje (míchačky).

Asfaltové emulze

Asfaltové emulze představují jemnou disperzi asfaltu ve vodě stabilizovanou povrchově aktivními látkami- emulgátory. Velikost částic asfaltu je většinou v rozmezí 1 až 20 mikrometrů. Jsou to hnědé kapaliny s nízkou viskozitou blízkou viskozitě vody. Jsou snadno aplikovatelné za běžných klimatických teplot. Z důvodu lepší přilnavosti k většině druhů silničního kameniva se vyrábějí emulze kationaktivní kyselého charakteru. Silniční emulze představují ekologicky příznivý trend. Jednotlivé druhy emulzí se liší jednak obsahem a druhem asfaltu, jednak rychlosti štěpení na povrchu kameniva. Asfaltová emulze se aplikuje pod pokládanou směs jako spojovací postřík.

Vlastní výplňový materiál

Jedná se o tuhé znečišťující látky odloučené ve filtračním zařízení při odsávání odpadních plynů z technologie. Odloučené částičky jsou při automatické regeneraci vzduchem uvolněny z povrchu filtrů, shromažďují se spolu s hrubým prachem ve spodní části zařízení, odkud jsou šnekovým dopravníkem odebírány a dopravovány ke korečkovému dopravníku, který je transportuje do pracovního síla. Odtud jsou přes separátní váhu dákovány dle receptury do připravované směsi nebo přepadávají do zásobníku vlastního výplňového materiálu, který je vybaveno limitní sondou pro kontrolu úrovně naplnění. Je-li v pracovním síle nedostatek materiálu, je přes dopravníky (šnekový dopravník, korečko) plněno z velkého síla vlastního výplňového materiálu.

Mletý vápenec

Mletý vápenec je skladován ve 2 provozních sílech o objemu 60 t. Ze síla č. 1 je šnekovým dopravníkem transportován do zásobníku u míchačky, dákován na váhu výplňového materiálu a odtud do hnětacího stroje. Silo č. 2 je zásobní, není propojeno s technologií. Při poklesu materiálu v síle č. 1 na minimum je mletý vápenec doplněn

pomocí vývěvy ze sila č. 2. Vstupy do plnicího potrubí sil jsou zajištěny uzamykatelnou mechanickou zábranou proti svévolnému nasazení potrubí od autocisterny. Jsou vybavena limitní sondou monitorující hladinu materiálu v síle a tkaninovými válcovými filtry s automatickou regenerací vzduchovým rázem. Bezpečnostní datový list mletého vápence je k dispozici u vedoucího obalovny.

Pojiva

Vláknité látky, jiná schválená pojiva, aditiva či barviva jsou skladovány v k tomu účelu určených zásobnících, např. v síle o objemu 0,5 t, nebo v původních obalech od dodavatele. Vláknitý granulát je dopravován šnekovým dopravníkem ze sila do zásobní násypky u míchačky, odkud je dávkován na váhu a do hnětacího stroje. V případě přeplnění násypky je nadbytek vláknitého granulátu přepadem dopraven do horkého korečkového elevátoru. V případě požadavku zákazníka je možné použít i další přísady, které lze ručně dávkovat přes násypku studeného recyklátu u míchačky, nebo jsou-li instalována příslušná přidávací zařízení.

3 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE VÝROBY ASFALTOVÝCH A BETONOVÝCH SMĚSÍ VE VYBRANÉM PODNIKU

Ve vybraném podniku se výrobní postupy řídí podle příruček systému řízení výroby a provozních řádů. Sekundární vstupní suroviny ve výrobě asfaltových a betonových směsí tvoří betonové, asfaltové a cihelné odpady. Nakládání s těmito druhy odpadů na recyklační ploše je definováno v zákoně o odpadech a provozním řádu dané recyklační plochy. Následné využití recyklátů ve výrobě je doprovázeno kompletními laboratorními zkouškami. (Zákon č. 541/2020 Sb.)

3.1 Metodické postupy ověřování vlastností vstupních odpadních materiálů

Ověřováním vlastností stavebních materiálů se obecně zabývá obor zkušebnictví, který obsahuje zkoušení materiálůvých vlastností v kompletní škále chemických, biologických, fyzikálně-mechanických a dalších vlastností, včetně použitelných zkušebních postupů a metod k jejich správnému vyhodnocení. Podstatným cílem je provést na základě zkušebních postupů vhodnou selekci materiálu, tak aby splňovaly požadavky pro daný účel použití. Je důležité kontrolovat a selektovat materiál na vstupu do laboratoře. To znamená, že materiál je žádoucí co nejvíce vytřídit, aby bylo dosaženo homogenity daného zkoušeného výrobku bez příměsí. (Brito, Saikia 2019)

Volba stavebního materiálu pochází z dlouhodobých zkušeností stavebních odborníků, především podle místně dostupných vhodných přírodních surovinových zdrojů. K jejich zachování a zároveň zkvalitňování byly výrobní postupy předávány z generace na generaci. Kvalita a funkčnost daných materiálů byla vyhodnocována převážně intuitivně a smyslově. V dřívějších dobách tento postup zajistil při použití do klasických konstrukcí dostatečnou trvanlivost a životnost. Během nástupu průmyslové výroby stavebních materiálů se na trhu objevovaly nové typy materiálů, které se častěji implementovaly do stavebních technologií a konstrukcí. Posuzování kvality materiálu se také začalo rozvíjet. Kvalitu materiálů bylo nutné objektivizovat a stanovit materiálové charakteristiky použitelné pro projektanty, uživatele a stavitele. Proto metody a podmínky pro posuzování prošly velmi intenzivním rozvojem. V současné době v oboru stavební činnosti je možné

posuzovat rozmanitý výběr materiálů, pomocných látek pro stavebnictví a samotných stavebních výrobků. Snaha docílit objektivních kritérií při vyhodnocování vlastností stavebních materiálů stále roste. Postupem času vznikaly stále nové a přísnější normy pro posuzování. Důležitá je vzájemná srovnatelnost výsledků posuzování kvality materiálů, proto se v poslední době dostávají do popředí celosvětové či evropské normy. Toto se týká hlavně nakládání s odpady a jejich následná recyklace či likvidace. Se zvyšujícími se požadavky na omezení znečišťování životního prostředí se také zpřísnují normy a limity pro nakládání s odpady. V oblasti recyklace stavebních odpadů je třeba odpady řádně testovat na obsah chemických látek, ekotoxicitu na živých organismech a radioaktivitu dle zákona o odpadech. Aby odpady mohly být vráceny zpět do výroby asfaltových či betonových směsí, musí splňovat technické požadavky na výrobky. Mezi tyto požadavky patří laboratorní zkoušky dané zákonem o odpadech, stanovení požadované zrnitosti schválené provozním výrobním řádem a žádné další druhotné materiály. (Brito, Saikia 2019; Zákon č. 541/2020 Sb.)

V mezinárodní praxi na evropské úrovni se již prosazují společné zkušební metody a postupy, které zamezují rozdílnému přístupu k hodnocení kvality stavebních materiálů na základech současného stavu poznání vědy a techniky ve světě. Největšího významu v dnešní době nabývají zkoušky, které jsou schopny určit životnost stavebního materiálu. Je také zkoumáno chování při různých druzích aplikacích a klimatických změnách. Ve zkušební laboratoři při zkouškách betonů se simuluje střídání tepla a zimy jako ročních období v několik cyklech. To znamená, že v laboratoři tedy lze simulovat výrazné střídání teplot několika desítek let, ale již zde nefiguruje například působení bakterií. Úsilí po vzájemné srovnatelnosti vyhodnocení výsledků v oblasti posuzování vlastností stavebních materiálů nejen pro obor stavebnictví, vedlo v počátku k vytvoření národních norem a zkušebních postupů. V dnešní době je snaha o co největší sjednocení norem v rámci mezinárodně uznávaných norem. Vznikají užší spolupráce mezi státy, které se snaží zlepšit trvanlivost stavebních materiálů a v první řadě snížit zátěž na životní prostředí. Je logické, že různé státy hodnotí na normativní úrovni vliv okolního prostředí dle různých kritérií. Přesto by měla být vyžadována celá škála zkoušek, které reprezentují ekologickou přijatelnost, zdravotní nezávadnost a udržitelnost budoucího využívání surovinových zdrojů dané země. Většina znalostí o kvalitě a vlastnostech stavebních materiálů vychází nejen z praktických zkušeností přímo na stavbách, ale i pomocí

zkušebních metod. Technické a právní podmínky na stavební prvky a výrobky v České republice mají platnost ze současně platných zákonů a nařízení vlády. (Kolář, Reiterman 2012; Brito, Saikia 2019)

3.2 Vstupní sekundární suroviny ve výrobě asfaltových směsí

Asfaltový recyklát

Asfaltové odpady lze rozdělit na dvě skupiny podle způsobu jejich odtěžení. První skupinou na Obrázku 3 jsou asfaltové kry, které vykazují větší kusovitost. Asfaltové kry jsou podle zákona o odpadech stavební odpad. Druhou skupinu tvoří vyfrézovaný materiál, který za určitých podmínek může být brán jako materiál. Daná firma musí mít certifikát o nestanovém výrobku silniční frézy a zároveň frézovaný materiál nesmí vykazovat limity platné pro zařazení mezi nebezpečné odpady. Certifikát určuje předepsanou zrnitost, kterou musí frézovaný materiál splňovat, aby se již nejednalo o odpad, ale o certifikovaný výrobek. Tento výrobek splní-li všechna kritéria výše uvedená a zároveň limity dané zákonem o uložení odpadu na povrchu terénu, může být dále distribuován jako materiál. Zrnitost certifikovaného produktu silniční frézy je většinou v rozmezí od 0 do 30 mm. (Herkul, 2015; Zákon č. 541/2020 Sb.)

Tento produkt prochází třídícím strojem na bázi vibračních sít. Výsledný produkt, který je žádoucí do výroby má obvykle zrnitost od 0 do 11 mm a od 0 do 16 mm dle požadavků výroby. Nadsítný materiál se poté následně drtí například odrazovým drtíčem, aby byl frézovaný materiál použit v celé své škále. Na rozdíl od toho asfaltové kry prochází pouze drtícím strojem, kde je již v primární fázi nadrcen v celé své škále. Vzhledem k výsledku zkoušek výsledné asfaltové směsi, která vychází z obalovny, se zjistilo, že by bylo dobré z asfaltového recyklátu vyjmout jemnozrné až prachové části recyklátu. To znamená, že ideálně by měl být asfaltový recyklát od 8 do 11 mm a od 8 do 16 mm. Zkoušky se dají označit za průkazné a platné legislativou, ale odstranění jemnějšího materiálu by mohlo dojít ke zlepšení výsledného produktu. (Herkul, 2015)

Ověřování vlastností a způsob získávání asfaltového recyklátu

Před použitím živičného recyklátu do výroby asfaltových směsí je nutné splnit podmínky limitů polyaromatických uhlovodíků, který stanovuje zákon a vyhlášky. Tyto aspekty se zkoumají, aby se při výrobě zamezilo úniku nežádoucích emisí do ovzduší. Pokud asfaltový recyklát splňuje podmínky dané zákonem a zrnitost dle výroby, lze jej použít ve

výrobě. V první řadě je důležité kontrolovat odpad na vstupu do recyklačních procesů. To znamená, že v místě odtěžení původní vozovky musí být odtěžen tak, aby nebyl kontaminován jiným druhem materiálu či odpadu. V této problematice obvykle figuruje znečištění zeminou či štěrkem, který slouží jako podklad pod živičným povrchem. Pokud jsou tyto postupy dodrženy a odpad obsahuje složky pouze živičného charakteru, dá se říci, že může být v celém svém množství recyklován a využit zpět ve výrobě. (Herkul, 2015)



Obrázek 3 - Asfaltové kry

2.4 Vstupní sekundární suroviny ve výrobě betonů

Betonový recyklát

V rámci praktického experimentu byla provedena srovnávací analýza nákladů a přínosů výroby přírodních a recyklovaných betonových agregátů pro betonárnu v Mostě, která byla založena na vzniku stavebního a demoličního odpadu, který se dále stupňuje v důsledku výměny a renovace stávajících konstrukcí. V současné době je většina

demoličních odpadů ukládána na skládky nebo používána v aplikacích s nízkou kvalitou, jako je výstavba silnic atd.

Jedním ze zmírňujících opatření je opětovné použití zničeného betonu jako recyklovaného betonového agregátu. Studie podle Ohemeng, Ekolu (2020) ukazuje, že čistý přínos výroby přírodního nebo recyklovaného betonového kameniva je negativní. Výroba recyklovaného betonového kameniva je však levnější než výroba přírodního kameniva.



Obrázek 4 - Betonový recyklát

V oblasti využití stavebního a demoličního odpadu je problém s rozpoznáním jeho vlastností a kvality. Stavební a demoliční odpad může být buď směsný, který obsahuje nejen beton, ale také velké množství asfaltu, dřeva, plastu, cihel a jiných materiálů. Také se vyskytuje jednosložkový, v němž převažuje jedna složka, zpravidla se jedná buď o beton, nebo o keramický střep. Pokud stavební a demoliční obsahuje více než 90 % drceného betonu a materiálů na bázi cementu, je možné z něj vyrobit recyklované betonové kamenivo a využít jej jako náhradu přírodního kameniva při výrobě betonu (viz Obrázek 4). Vlastnosti recyklovaného betonu se liší od vlastností přírodního kameniva a i v normě 2021

pro zkoušení kameniva do betonu ČSN EN 12 620 + A1 a ČSN EN 206 jsou uvedeny speciální limity pro recyklovaný beton použitý ve výrobě. (ČSN, 2018a; Nováková, Mikulica, 2018)

Ověřování vlastností a způsob získávání betonového recyklátu

Je důležité kontrolovat odpad na vstupu do recyklačních procesů, aby neobsahoval žádné druhotné materiály, jako například zeminu a jíly, dřevo nebo keramické výrobky. Výskyt těchto nežádoucích materiálů má za následek negativní účinky, jak z hlediska testování a funkčnosti betonových směsí tak i z hlediska technologie výroby. Výskyt zbytkového dřeva či železa v betonovém recyklátu, může vážně poškodit výrobní linku betonárny. Může se jednat například o protrhnutí pasu železem nebo ucpání na výsypce materiálu na skipový vozík. Na Obrázku 5 se nachází vhodný betonový odpad použitelný ve výrobě betonů. (Herkul, 2015)



Obrázek 5 - Betonové kry

Způsob získávání betonového odpadu má největší zastoupení v oblasti demolice starých objektů. Zvláště při těchto činnostech je velmi obtížné a nákladné vytřídit odpad z demolice přímo na stavbě, ale je to neúčinnější. Je velmi těžké a nákladné vytřídit beton od ostatních materiálů z demolice po přivezení na recyklační plochu. Odpadový beton, který bude použit do výroby betonu, by tedy měl být čistý beton. V krajních případech by mohl obsahovat 10 % druhotných materiálů, jako jsou například cihly a keramické výrobky. Nejlepší možností pro získání čistého betonového odpadu je například z betonových panelů a žlabů. Tyto typy betonových výrobků, lze obvykle lehce vytřídit od ostatních materiálů. Vhodně vybraný typ betonu je poté následně drcen na menší frakci, většinou se jedná o frakci 0 až 32 mm. Nadrcený beton putuje do třídícího stroje, kde je pomocí vhodných typů sítí vytříděn na frakci 8 až 16 mm, která odpovídá náhradě za přírodní kamenivo stejné frakce. (Herkul, 2015)

Cihlový recyklát

Recyklované cihly (viz Obrázek 6) se nejčastěji využívají jako zásyp potrubí a elektrikářských kabelů. Za určitých podmínek jsou využívány při stavbě tenisových kurtů. V zájmu řešení nedostatku přírodního písku a snížení stavebního odpadu z hlíněných cihel se zkoumá využití recyklovaných cihel k nahrazení písku jako jemného kameniva k výrobě udržitelnějšího betonu. Výsledky ukazují, že nahrazení snižuje migraci chloridů, ale zvyšuje absorpci vody, sorptivitu vody, smrštění a karbonataci. Absorpci vody, sorptivitu vody a karbonizaci lze minimalizovat snížením dalšího obsahu vody. Výsledky mikroskopie ukazují, že struktura pórů betonu se zhoršuje s nárůstem náhrady kvůli porézní struktuře. (Winkler, 2010; Dang et al., 2020)

Rostoucí rozvoj infrastruktury vedl k neustálému úbytku přírodních surovin potřebných pro betonářské práce. Beton je homogenní směs, která se skládá z cementu, jemného kameniva, hrubého kameniva a vody v různých poměrech. Cement je jedním z nejnákladnějších a nejnáročnějších stavebních materiálů používaných pro přípravu betonu. Také kvůli velké spotřebě jsou široce zkoumány a používány náhražky cementu. Nejvýhodnější jsou náhražky odpadních materiálů, protože se řídí udržitelným přístupem. Mezi tyto materiály patří i cihelné výrobky a z nich následně vyrobené recykláty. Rostoucí průmyslové odvětví způsobuje produkci masivního pevného odpadu. Využití pevného

odpadu v betonu přineslo zájem mnoha výzkumníků, kteří používají odpad jako náhradu cementu. To také svým způsobem vede ke snížení globálních emisí skleníkových plynů. Výroba cementu produkuje CO₂, který významně přispívá ke skleníkovým plynům. Ve výzkumu podle Gautam et al., (2020) je uvažován hlavně vliv keramického odpadu na fyzikální, chemické, mechanické a trvanlivé vlastnosti různých forem betonu. Lepší mechanické a trvanlivé vlastnosti byly hlášeny u betonu obsahujícího keramický odpad jako náhradu cementu a kameniva. Byl učiněn závěr, že použití keramického odpadu ve stavebnictví nejen snižuje náklady na stavební materiál, ale také pomáhá dosáhnout udržitelnosti.



Obrázek 6 - Cihlový recyklát

3.1 Technologické postupy v obalovně živičné směsi

Obalovna živičných směsí je tvořena zastřešenými deponiemi kameniva různých frakcí a asfaltového granulátu (recyklátu), zásobními silami vstupního materiálu, zásobním

silem vláknité látky -celulózy, vyhřívanými skladovacími nádržemi asfaltu, samotnou technologickou linkou s řídicím kontejnerem (velínem), zásobníkem separačního oleje, příručním skladem a obslužnou rampou (viz Obrázek 7). K zázemí obalovny patří další objekty, které slouží. Jako příruční sklady, garáže, laboratoř a zásobník na vodu. Technologická linka obalovny živičných směsí AMMANN UNIGLOBE 180 (výrobce AMMANN Asphalt GmbH) je tvořena osmikomorovým řadovým zásobníkem kameniva, zásobníky recyklátu, dávkovacími pásy, sběrným pásem, odlučovačem nadzrna, zavážecím pásem, vysoušecím válcem ES 2390 RAH 50, paralelním sušicím bubnem RA 180, korečkovým elevátorem, šnekovými dopravníky, čerpadly, prosévacím strojem, horkými minerálními sily, váhami, mísicím zařízením neboli míchačkou či hnětacím strojem, nákladními vozíky. (Herkul, 2019)

Vysoušecí válec ES 2390 RAH 50 je tvořen rotačním válcem a dvěma pevnými koncovými částmi na vstupu a výstupu materiálu. Rotační buben je zkonstruován z tepelně odolné a otěru odolné oceli, v místech nejvíce vystavených tepelnému a mechanickému namáhání je zesílen. Na vnitřním povrchu rotačního bubnu jsou nainstalovány lopatky a kapsy zajišťující odběr, promísení a vykládku ohřívaného materiálu tak, aby byla zajištěna optimální tepelná výměna se spalovacím plynem a zároveň se zamezilo pádu materiálu na volný plamen hořáku. V místě vstupu materiálu do vysoušecího válce se nachází dva otvory, z nichž jeden umožňuje vsázku předem nadávkovaného inertního materiálu (kameniva) do válce přes podávací (zavážecí) pás a druhý je určen k odsávání kouře a prachu.



Obrázek 7 – Obalovna živičných směsí HERKUL Most

3.2 Technologické postupy v betonárně

Společnost HERKUL . na základě důkladné analýzy trhu a potřeb zákazníků stále rozšiřuje své portfolio služeb, a proto uvedla do provozu svou vlastní horizontální betonárnu Stetter H1-RS na Obrázku 8. (Herkul, 2018)

K dispozici má betonárna 3 zásobníky na vodu z vlastního vrtu a dále 1 zásobník na teplou vodu, která je přímo součástí technologie betonárny na 30 m³ a který je plněn primárně vodou z vrtu. Součástí betonárny je talířová míchačka Stetter T1000, šnekové dopravníky, zásobníky kameniva. Materiál je skladován v kójkách u betonárny a je přepravován pomocí strojního nakladače do zásobníků písků a kameniva. Odtud je materiál vysypán na dopravní vážicí pás a poté do pojezdového vozíku pohybující se ve skipové dráze. Ze skipového vozíku je materiál přepraven do míchačky k míchání betonových směsí. Na Obrázku 2 lze vidět sila na cement. Chemické přísady jsou skladovány v kontejnerech a do míchačky jsou přímo přepracovány pomocí čerpadla. (Herkul, 2018)



Obrázek 8 – Betonárna HERKUL Most

4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

Pro stanovení optimalizace výroby za použití recyklovaných materiálů byly ve vybraném podniku vyrobeny zkušební vzorky, které byly vyhodnoceny v akreditované laboratoři. Výsledky zkoušek i samotná laboratoř se řídí platnými normami. Za účelem porovnání vlivů na konečný výrobek byly vyrobeny vždy 2 směsi, první s recyklátem a druhá bez recyklátu. Betonová směs použitá v analýze se označuje 25/30 XF1,XC2. Asfaltové směs má označení ACP 16+50/70 používaná pro podkladní vrstvy.

4.1 Metodické postupy laboratorních zkoušek

Vzorkování betonových směsí

Vzorkování betonu lze rozdělit na zkoumání vlastností čerstvého betonu a zkoumání vlastností zatvrdlého betonu. Na obrázku 9 jsou vyobrazeny zkušební vzorky na betonárně před přepravou do laboratoře.



Obrázek 9 - Vzorky betonu

U čerstvého betonu se zkoumá konzistence zkouškou sednutím kužele (viz Obrázek 10) podle normy ČSN EN 12350-2, a metodou rozlitím čerstvého betonu dle 2021

normy ČSN EN 12350-5. Zkouška sednutí kužele se provádí pomocí speciálního válce a měřidla na obrázku. U provzdušněných betonů s minimální vlastností XF1 se stanovuje obsah vzduchu speciálním měřidlem podle normy ČSN EN 12350-7. Pro určení přesné hmotnosti a kontrolu správného dávkování vstupních surovin slouží zkouška pro stanovení objemové hmotnosti na vzorcích pravidelných geometrických tvarů dle normy ČSN EN 12390-7. Čerstvý beton se zkoumá přímo v místě míchání a slouží jako kontrolní podklady pro laboratoř, které zkoumá vlastnosti zatvrdlého betonu.(ČSN 2009c; ČSN 2009d; ČSN 2009e; ČSN 2019)



Obrázek 10 - Nástroj pro určení sednutí betonu

V laboratoři se zatvrdlý beton testuje na pevnost v tlaku zkušebních těles po 7, 28 a 90 dnech podle normy ČSN EN 12390-3. Následuje stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou podle normy ČSN EN 12390-8, dále stanovení vodotěsnosti betonu podle normy ČSN EN 73 1321. Poslední zkouška prováděná v laboratoři zkoumá odolnost betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek v simulaci pro dlouhodobou životnost betonu podle normy si ČSN EN 73 1326.(ČSN 1985; ČSN 1988; ČSN 2009f; ČSN 2009g)



Obrázek 11 - Kostky pro zkušební vzorky betonu

Laboratorní analýza betonových směsí

Pro stanovení všech vlastností dle norem je potřeba provést zkoušky čerstvého betonu přímo na betonárně pomocí speciálních měřidel. Zkoumá se obsah vzduchu, teplota a konzistence betonu. Na Obrázku 11 lze vidět tělesa určené pro zrání betonu pro laboratorní zkoušky. Pro účely této práce byly vyrobeny zkušební tělesa, vždy pro každý vzorek 12 zkušebních těles, které byly následně zaslány do laboratoře, kde byly vyhodnoceny výsledky dle normy. Pro správné řízení systému výroby vydává laboratoř na základě prvotních laboratorních zkoušek zkoušky průkazní dle normy ČSN EN 206. Bez těchto zkoušek nelze beton vyrábět a dále distribuovat. Pro kontrolu a prodloužení průkazních zkoušek slouží zkoušky kontrolní, které se provádí podle daného systému řízení výroby, obvykle se jedná o 50 m³ každého vyrobeného druhu betonu.(ČSN 2018a)

Vzorkování asfaltových směsí

Odběr vzorku asfaltových směsí podléhá normě ČSN EN 12697-27, ve které jsou stanoveny zkušební metody pro vzorkování asfaltové směsi za horka. V protokolu ze

zkušební laboratoře jsou uvedeny následující zkoušky: zkouška typu asfaltové směsi dle ČSN EN 12591, síťový rozbor (viz Obrázek 13) dle ČSN 12697-2, objemová hmotnost zkušebního tělesa dle ČSN EN 12697-6+A1, mezerovitost zkušebního tělesa dle ČSN EN 12697-8, stupeň vyplnění mezer dle ČSN EN 12697-8 a mezerovitost směsi kameniva dle ČSN EN 12697-8.(ČSN 2004; ČSN 2008; ČSN 2009b; ČSN 2015; ČSN 2018b)



Obrázek 12 - Extrakční přístroj

Laboratorní analýza asfaltových směsí

Křivka zrnitosti vychází ze zrnitostního rozboru proséváním za sucha dle normy ČSN EN 933-1. Před zahájením zkoušky musí být kamenivo vysušeno při teplotě 110 °C do stálé hmotnosti. K vysušení dochází v extrakčním přístroji(viz Obrázek 12). Zkouška probíhá tak, že dojde k roztřídění a oddělení jednotlivých zrn kameniva pomocí sít s klesající velikosti otvorů. U směsi s recyklátem i u směsi bez recyklátu byla stanovena maximální objemová hmotnost postupem dle ČSN EN 12697-5. Zkouška probíhá v pyknometru, který se naplní vysušeným vzorkem a po zahřátí na okolní teplotu se určí jeho hmotnost. Mezerovitost určuje objem mezer ve zkušebních vzorků, který se vyjadřuje v

procentech celkové hmotnosti vzorku. Během této zkoušky se určuje také stupeň vyplnění mezer asfaltem a mezerovitost směsi kameniva.(ČSN, 2010; ČSN, 2012)



Obrázek 13 - Prosévací přístroj

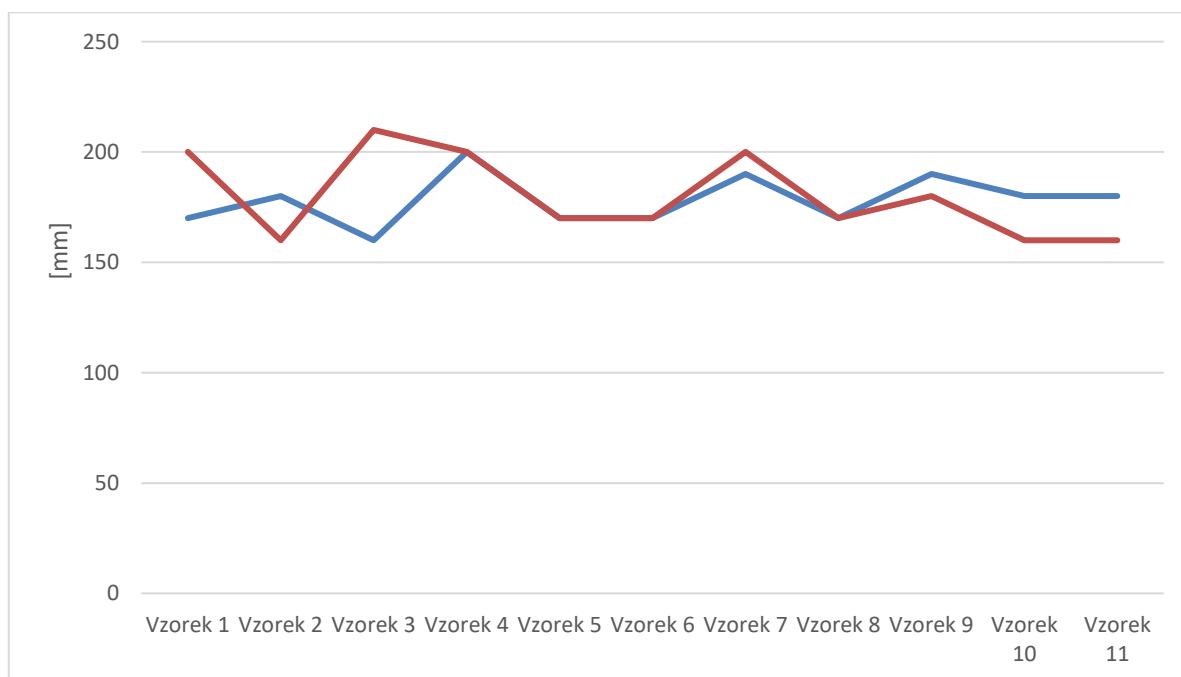
4.2 Betonové směsi

V Tabulce 1 je vypsán počet odebraných vzorků a datum jejich výroby. Pro zkoušku betonu s recyklovaným betonem bylo vyrobeno 11 zkušebních vzorků. Zkoumaná betonová směs má označení 25/30 XF1, XC2. XF1 označuje stupeň provzdušnění a XC2 označuje vodotěsnost betonu.

Tabulka 1 - Data výroby a odběru vzorků (betonový recyklát)

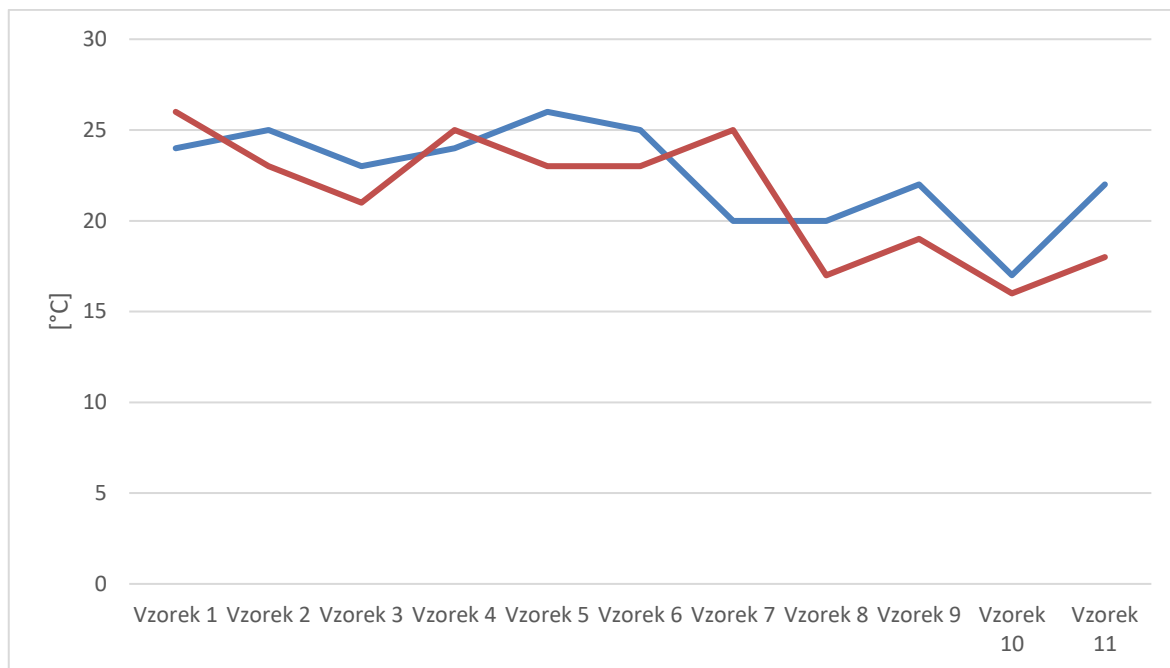
Číslo vzorku	Data výroby
Vzorek 1	16. 7. 2020
Vzorek 2	6. 8. 2020
Vzorek 3	27.8.2020

Vzorek 4	1.9.2020
Vzorek 5	15.9.2020
Vzorek 6	23.9.2020
Vzorek 7	6.10.2020
Vzorek 8	14.10.2020
Vzorek 9	19.10.2020
Vzorek 10	26.10.2020
Vzorek 11	2.11.2020


Obrázek 14 - Sednutí kužele

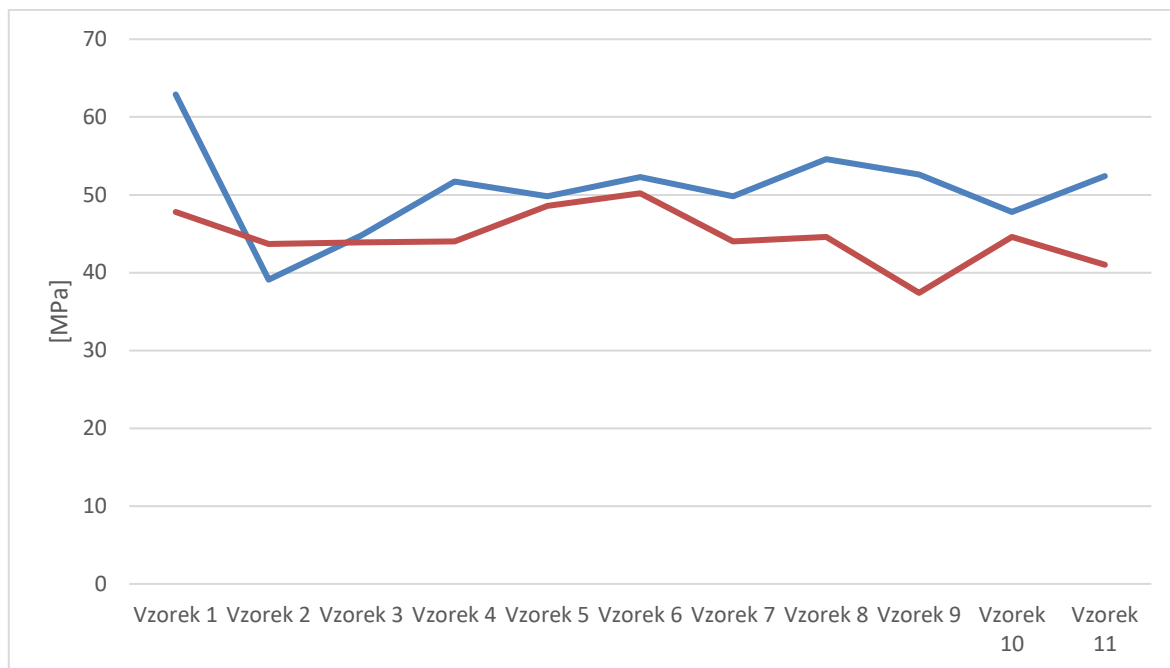
Legenda k Obrázku 14: — recyklovaný beton; — přírodní kamenivo

Receptury pro stanovené zkušební vzorky jsou nastaveny na konzistenci S4, která odpovídá sednutí kužele 160 až 210 mm. Z grafu v Obrázku 14 vyplývá, že všechny zkušební vzorky odpovídají těmto hodnotám. Avšak jsou zde výkyvy v konzistenci receptur s recyklovaným betonovým kamenivem a přírodním kamenivem. Příčinu těchto výsledku lze přisuzovat horkým letním teplotám a nižším zimním teplotám, kde plastifikátor MasterGlenium 115 používaný v recepturách pro recyklované betonové kameniva zasahuje do konzistenci receptury. Rozdílné hodnoty lze přičíst i různé vlhkosti vstupních surovin v různých obdobích. Všechny testované betony odpovídají normám pro konzistenci S4.

**Obrázek 15 - Teplota čerstvého betonu**

Legenda k Obrázku 15: — recyklovaný beton; — přírodní kamenivo

Teplota čerstvého betonu je závislá na teplotě vstupních surovin. Při skladování sypkých materiálů na slunci dochází k ohřívání. Sila s cementem jsou také vlivem venkovních teplot ohřívány. Teplota čerstvého betonu by se měla pohybovat od 15 °C do 26 °C. U vzorků 1 až 6 je vidět hraniční hodnota teploty. Vzorky 1 až 6 byly odebrány ve výrazně teplejším období než ostatní vzorky. Betonová směs s recyklovaným betonem nevykazuje výrazně změny či výkyvy teplot oproti směsi s přírodním kamenivem. Z Obrázku 15 vyplývá, že v horkých letních obdobích je možné tento typ betonu vozit na kratší dojezdovou vzdálenost nebo použít ochlazovací prostředky, jako například suchý led. Další možností je směřovat betonáže na ranní nebo večerní hodiny v letních obdobích. Tato možnost je více používána než aplikace suchého ledu.

**Obrázek 16 – Pevnost v tlaku po 28 dnech**

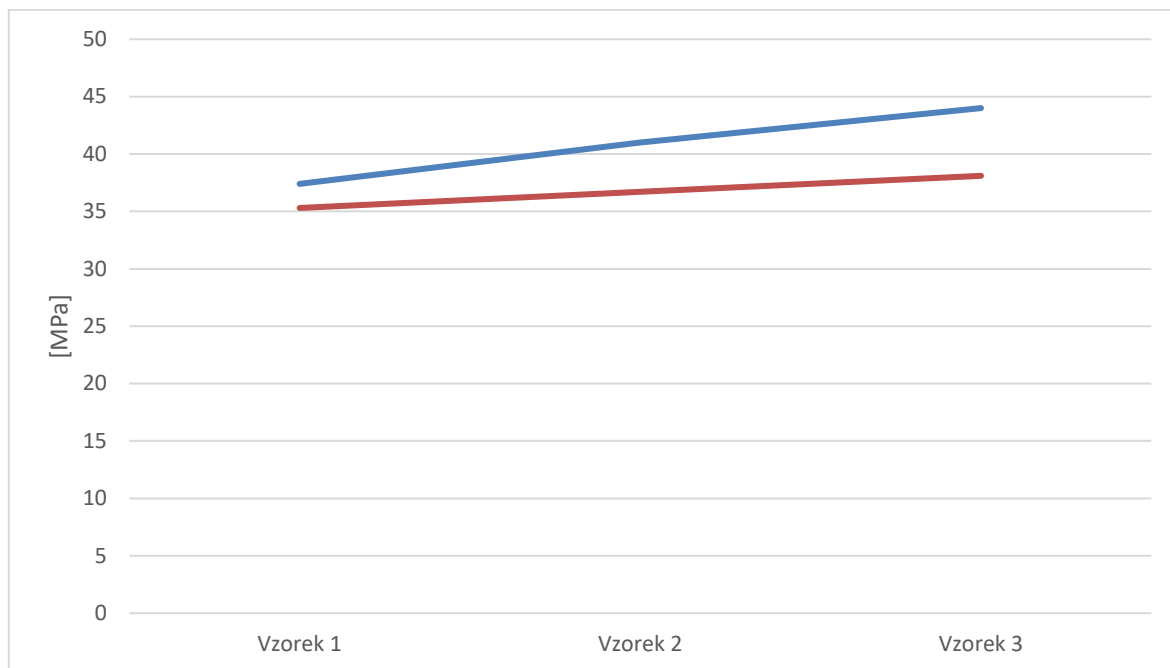
Legenda k Obrázku 16: — recyklovaný beton; — přírodní kamenivo

Pevnost v tlaku zkušebního tělesa by měla být dle normy větší než 35 MPa. Z obrázku 16 je vidět, že jak betonová směs s recyklovaným kamenivem, tak i směs s recyklovaným betonem těmto limitům odpovídají. Výkyv u vzorku 1 a 2 může být dán použitým plastifikátorem pro receptury s recyklovaným betonem. Jelikož se jedná o stejnou třídu betonu, tak byly dodrženy limity pro minimální obsah cementu za účelem dodržení pevnosti betonu. Plastifikátor MasterGlenium 115 nahrazuje v receptu vodu ve stejné konzistenci. Recyklovaný beton nemá tak dobré pojivě vlastnosti jako drcený kámen. Každé kilo plastifikátoru nahrazuje v receptuře přibližně 10 l vody, proto je pevnost u recyklovaných betonů většinou větší.

V Tabulce 2 je vypsán počet odebraných vzorků a data jejich výroby. Pro zkoušku betonu s recyklovaným cihelným odpadem byly vyrobeny 3 zkušební vzorky.

Tabulka 2 - Data výroby a odběru vzorků (cihelný recyklát)

Číslo vzorku	Data výroby
Vzorek 1	5.1.2021
Vzorek 2	18.1.2021
Vzorek 3	30.1.2021



Obrázek 17 - Pevnost v tlaku po 28 dnech

Legenda k Obrázku 17: — cihelný recyklát; — přírodní kamenivo

Pevnost v tlaku tělesa by měla být dle normy větší než 35 MPa. Z Obrázku 17 je vidět, že obě směsi těmto limitům odpovídají. Nejsou zde žádné výkyvy, pouze navýšená pevnost v tlaku u betonu s cihelným odpadem, která se dá vysvětlit jako vliv použití nanofileru, který nahrazuje v jisté míře vodu, stejně jako u betonového recyklátu.

4.3 Asfaltové směsi

Pro porovnání vlivů recyklovaného asfaltu na výsledný produkt byly vyrobeny dvě zkušební směsi. První směs s použitím 40 % recyklovaného asfaltu a druhá pouze s přírodním kamenivem. Obě zkušební směsi se označují ACP 16 + 50/70 používané pro podkladní vrstvy.

Tabulka 3 - Podíl hmotnosti vstupních surovin (40 % recyklovaný asfalt)

Označení vstupních surovin	Frakce kameniva [mm]	Podíl [% hmotnosti]
1	Štěrka 0-4	18
2	Štěrka 4-8	6
3	Štěrka 8-11	8
4	Štěrka 8-16	24
5	Recyklovaný asfalt 0-16	40
6	Filer	4

Tabulka 4 - Sítový rozbor vstupních surovin (40 % recyklovaný asfalt)

	Označení vstupních surovin	Průměr síta [mm]											
		0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4
[%]	1	6,1	9	13	20	35	62	96	100				
	2	0	0	0	0	0	0	1	9	91	100		
	3	0	0	0	0	0	0	1	2	11	92	100	
	4	0	0	0	0	0	1	2	3	14	53	96	100
	5	11,8	14	19	29	36	51	68	77	89	96	100	
	6	81	92	98	100								

Recyklovaný asfalt nahrazuje ve stejné asfaltové směsi přírodní kamenivo. Z poměru úbytku kameniva v Tabulce 3 a 5 lze vidět, že nejvíce ubylo šterku frakce 0 až 4 mm a šterku frakce 4 až 8 mm. Asfaltový recyklát tedy obsahuje ve větší míře jemnější částice.

Použitý asfaltový recyklát je ve frakci 0 až 16 mm. Pro maximální využití asfaltového odpadu je žádoucí využití výroba asfaltového recyklát už od frakce 0 mm. Kdyby vyžadovala výroba frakci 8 až 16 mm, zbýval by nevyužitý odpad od frakce 0 až 8 mm. Mohlo by to ale vést ke zlepšení výsledného produktu

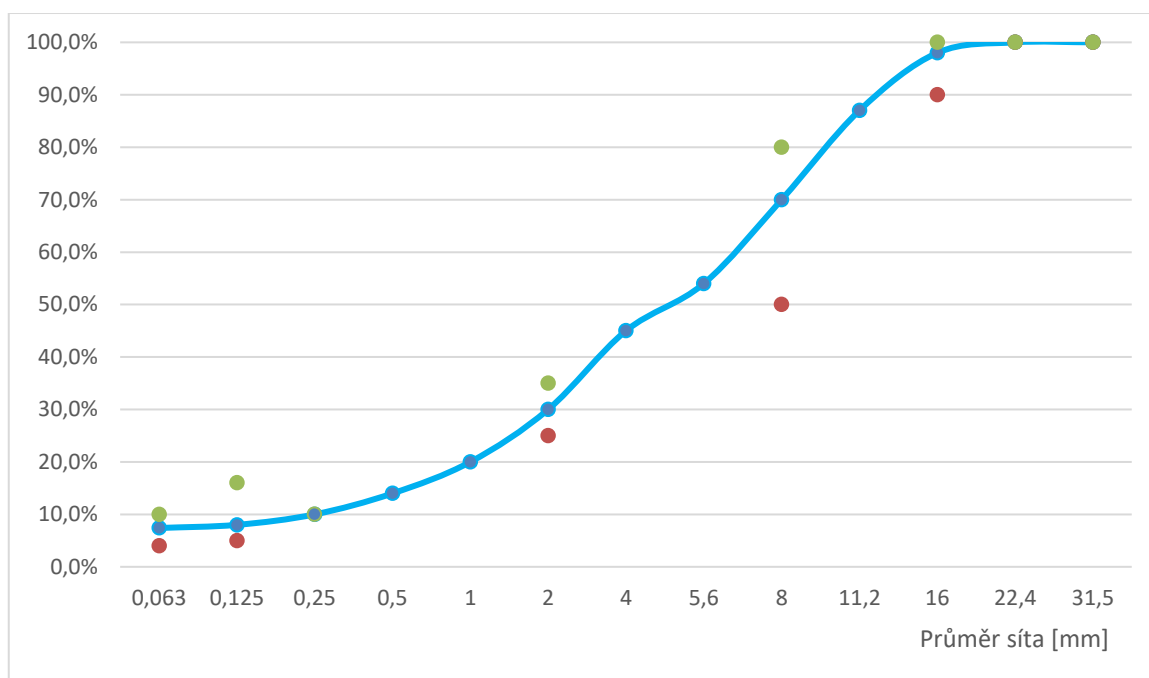
Tabulka 5 - Podíl hmotností vstupních surovin

Označení vstupních surovin	Frakce kameniva [mm]	Podíl [% hmotnosti]
1	Šterk 0-4	30
2	Šterk 4-8	18
3	Šterk 8-11	17
4	Šterk 8-16	30
5	Filer	5

Pro asfaltovou směs ACP 16+ 50/70 používanou pro podkladní vrstvy je horní hranicí frakce kameniva 16 mm. V Tabulce 4 a 6 je vidět minimální přesah nad sítem 16 mm. Během přepravy, nakládky a vykládky může dojít k přimíchání nežádoucí frakce kameniva. Tato odchylka 4 % je v normě pro stanovení zrnitosti kameniva.

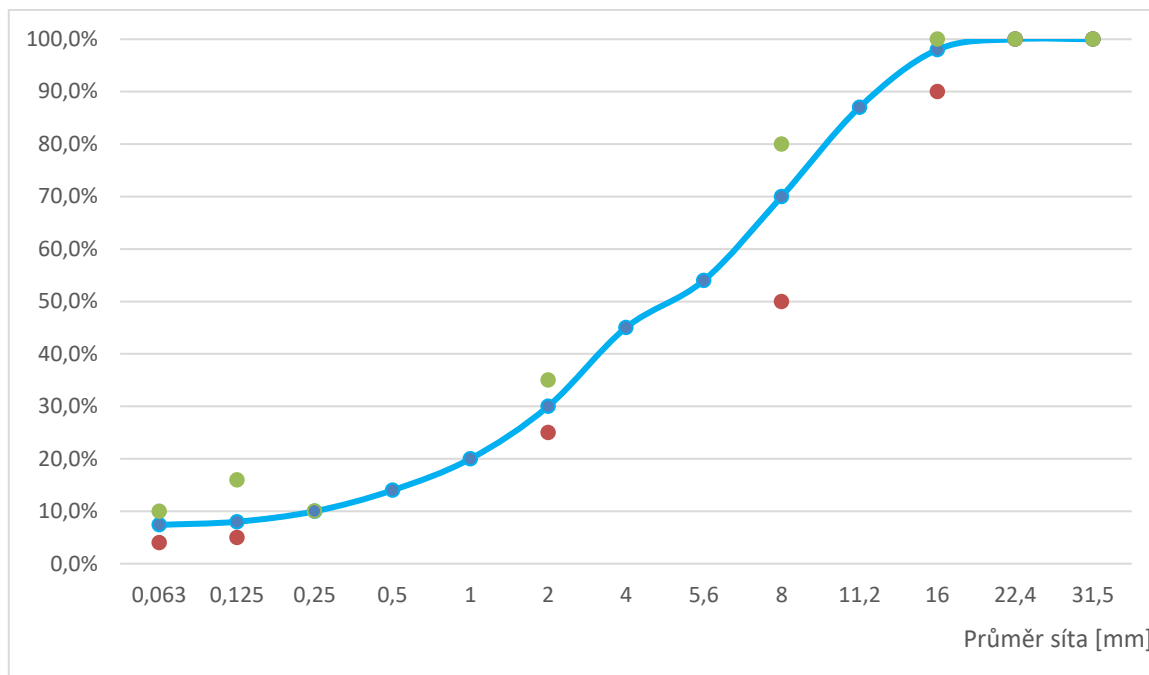
Tabulka 6 - Sítový rozbor

	Označení vstupních surovin	Průměr síta [mm]											
		0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	5,6	8	11,2	16	22,4
[%]	1	6,8	9	13	21	36	65	98	100				
	2	0,1	0	0	0	0	0	4	36	93	100		
	3	0,1	0	0	0	0	0	1	1	7	95	100	
	4	0,1	0	0	0	0	0	1	1	4	51	96	100
	5	90,7	99	100	29	36	51	68	77	89	96	100	


Obrázek 18 - Křivka zrnitosti (40 % recyklovaný asfalt)

Legenda k Obrázku 18: — výsledek zkušební směsi; ● minimální hodnota; ● maximální hodnota

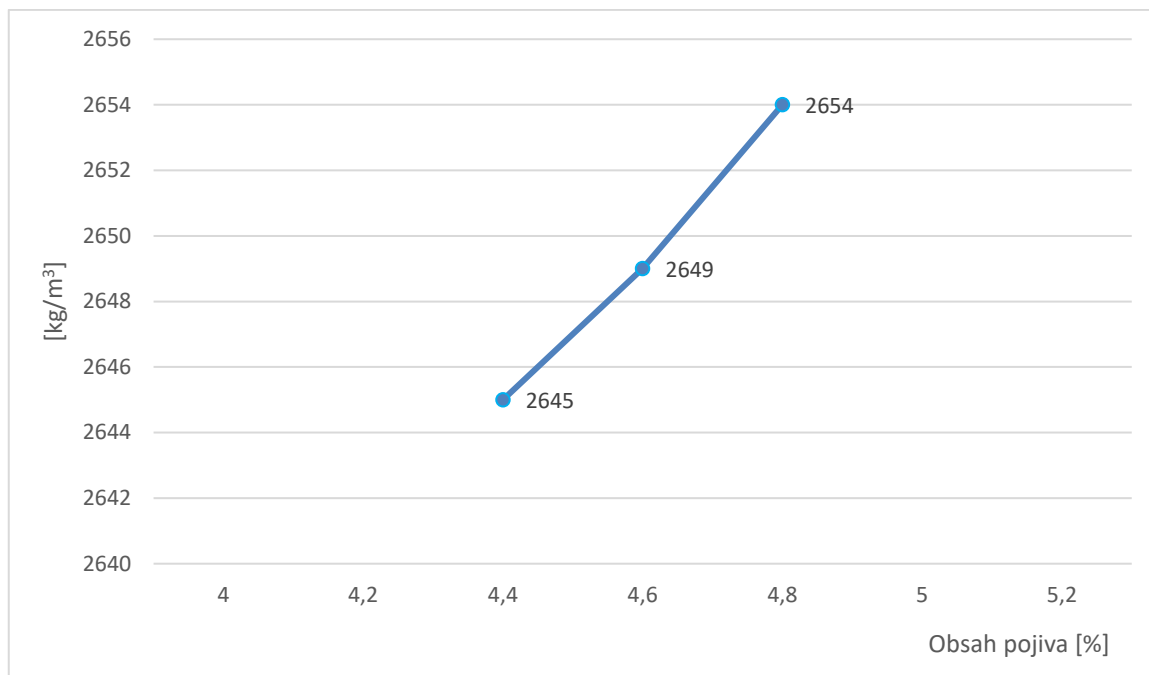
Z Tabulek 4 a 6 byla vytvořena křivka zrnitosti. Graf v Obrázku 18 odpovídá hodnotám z Tabulky 4. Je zde vyznačen maximální a minimální propad jednotlivými síty v procentech. Na křivce nejsou vyobrazeny žádné výrazné výkyvy a odpovídá požadavkům laboratorních zkoušek.



Obrázek 19 - Křivka zrnitosti

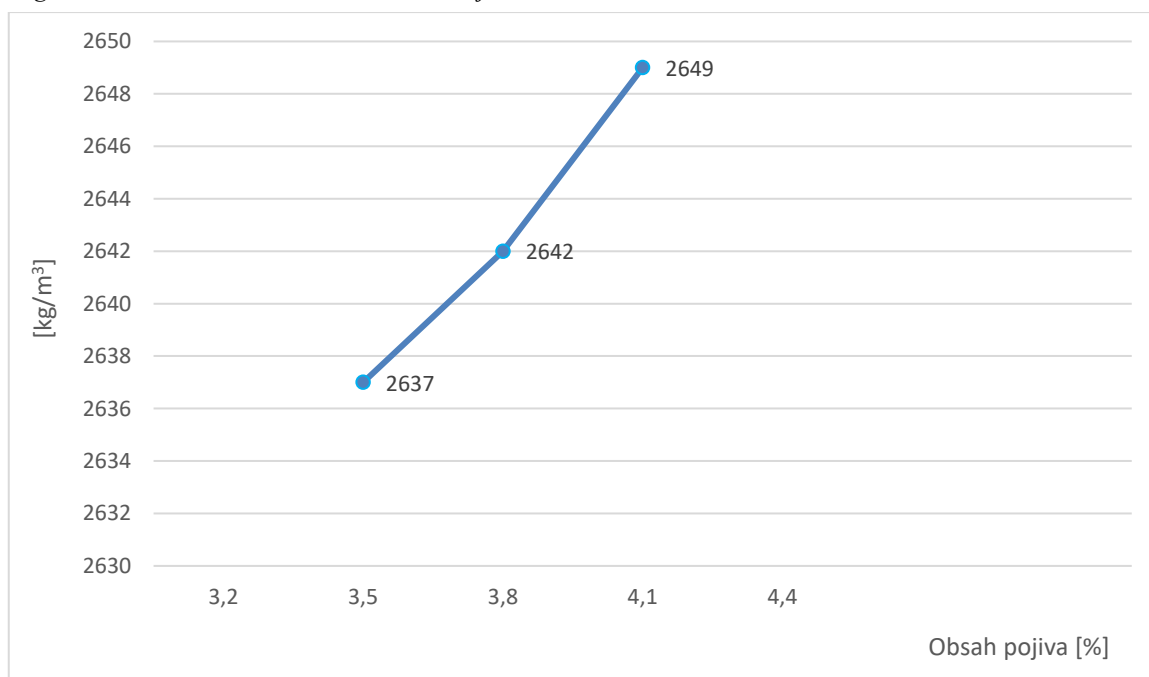
Legenda k Obrázku 19: — výsledek zkušební směsi; ● minimální hodnota; ● maximální hodnota

Křivka zrnitosti na Obrázku 19 odpovídá Tabulce 6 směsi bez recyklovaného asfaltu. Je zde opět vidět přesah nad sítem 16 mm. Z těchto údajů vyplývá, že nadsítý materiál se v tomto případě nacházel ve šterku, nikoliv v asfaltovém recyklátu. Tato křivka splňuje normy pro danou asfaltovou směs.



Obrázek 20 - Objemová hmotnost tělesa (40 % recyklovaný asfalt)

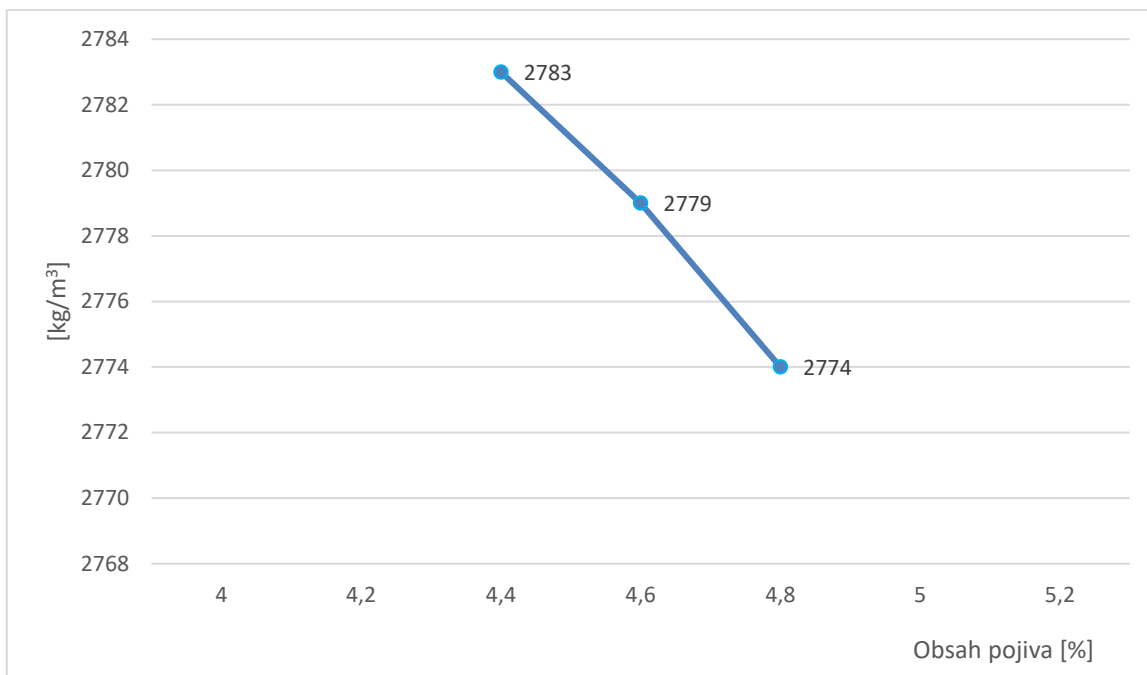
Legenda k Obrázku 20: — objemová hmotnost tělesa



Obrázek 21 - Objemová hmotnost tělesa

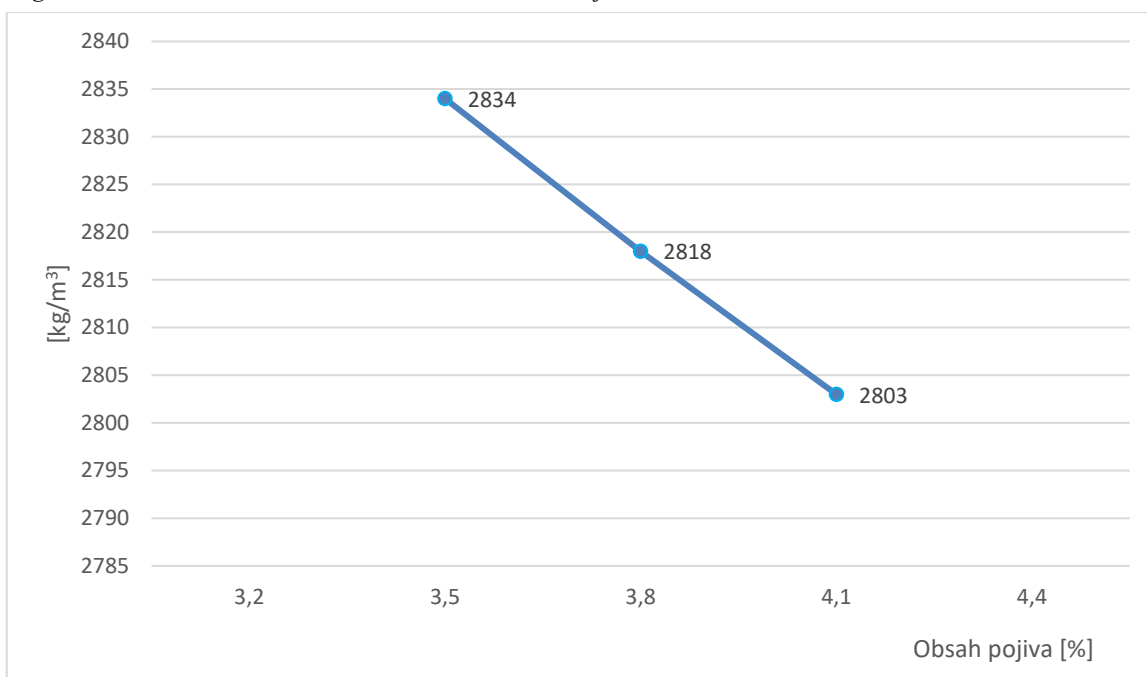
Legenda k Obrázku 21: — objemová hmotnost tělesa

Z Obrázku 20 a 21 vyplývá, že pro stanovení stejné objemové hmotnosti bylo v první směsi s recyklátem použito více tvrdšího pojiva. Optimální použití pojiva u směsi s recyklátem je 4,6 %, u směsi bez recyklátu 3,8 %.



Obrázek 22 - Maximální objemová hmotnost tělesa (40 % recyklovaný asfalt)

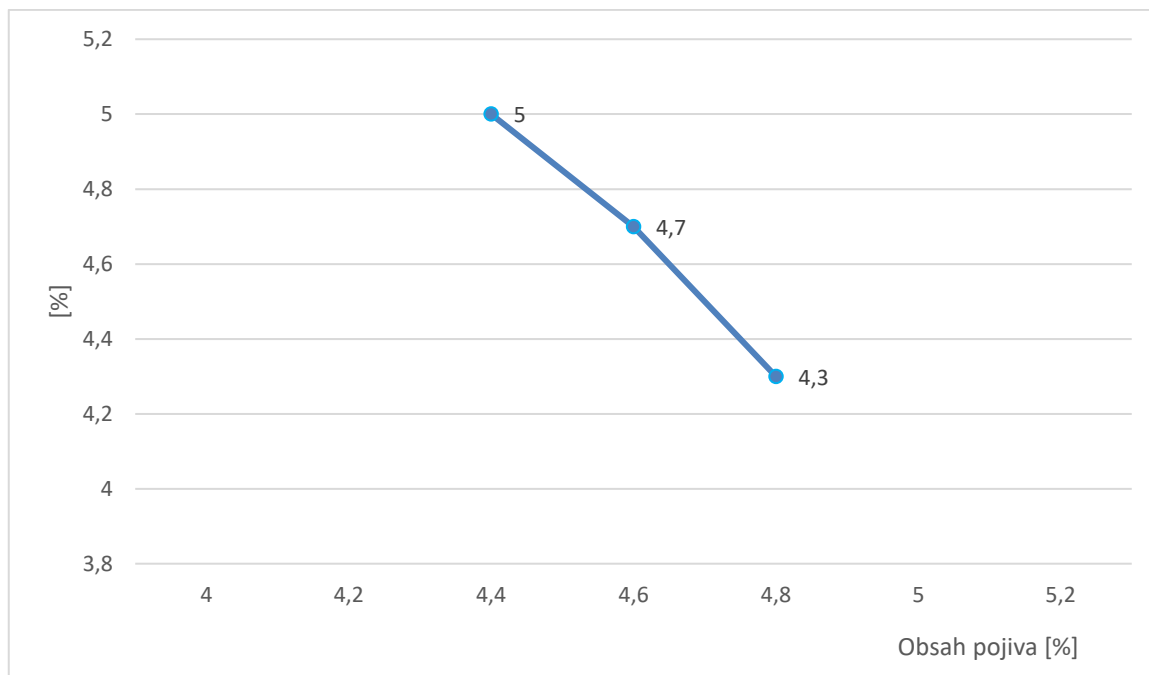
Legenda k Obrázku 22: — maximální objemová hmotnost tělesa



Obrázek 23 - Maximální objemová hmotnost tělesa

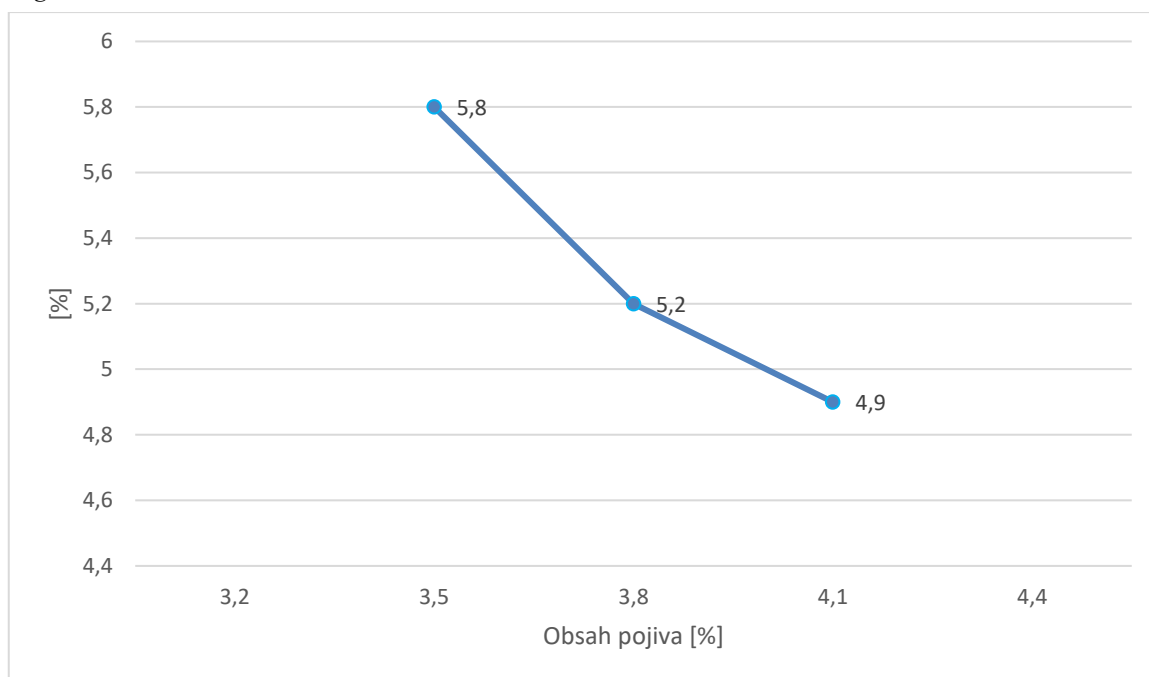
Legenda k Obrázku 23: — maximální objemová hmotnost tělesa

Na Obrázku 22 a 23 jsou dány hodnoty maximální objemové hmotnosti dané receptury asfaltové směsi. Tyto hodnoty jsou dány technologem dané obalovny podle vstupních surovin. Obě zkušební směsi nepřekračují hodnoty maximální objemové hmotnosti.



Obrázek 24 - mezerovitost (40 % recyklovaný asfalt)

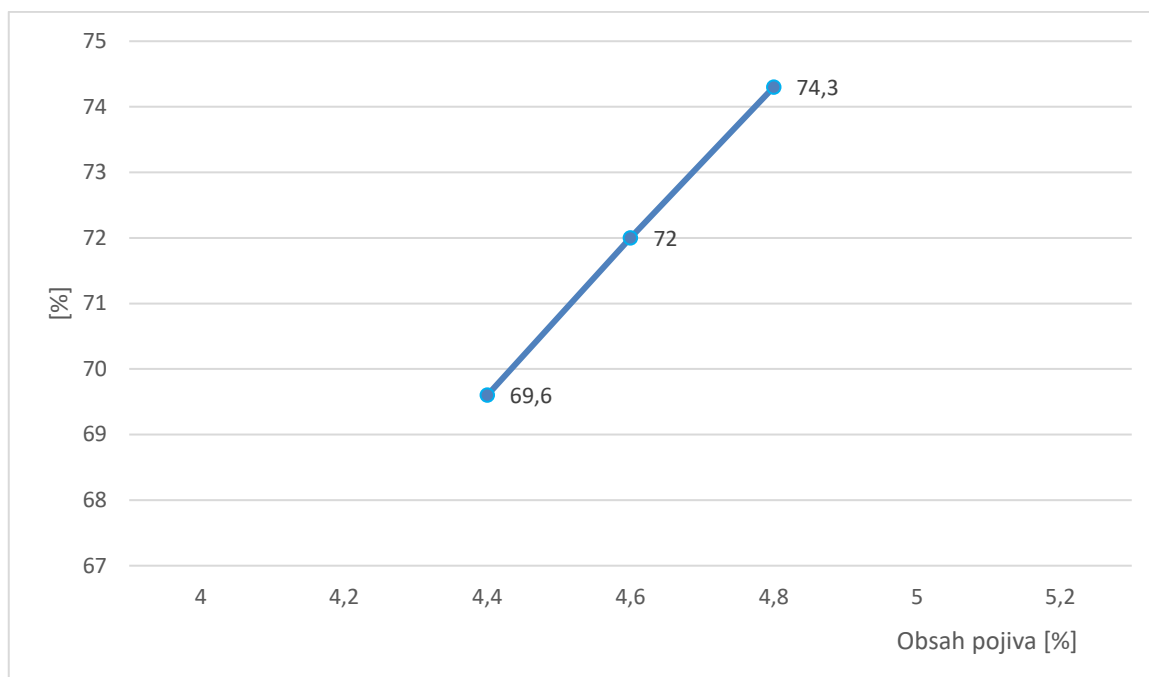
Legenda k Obrázku 24: — Mezerovitost



Obrázek 25 - Mezerovitost

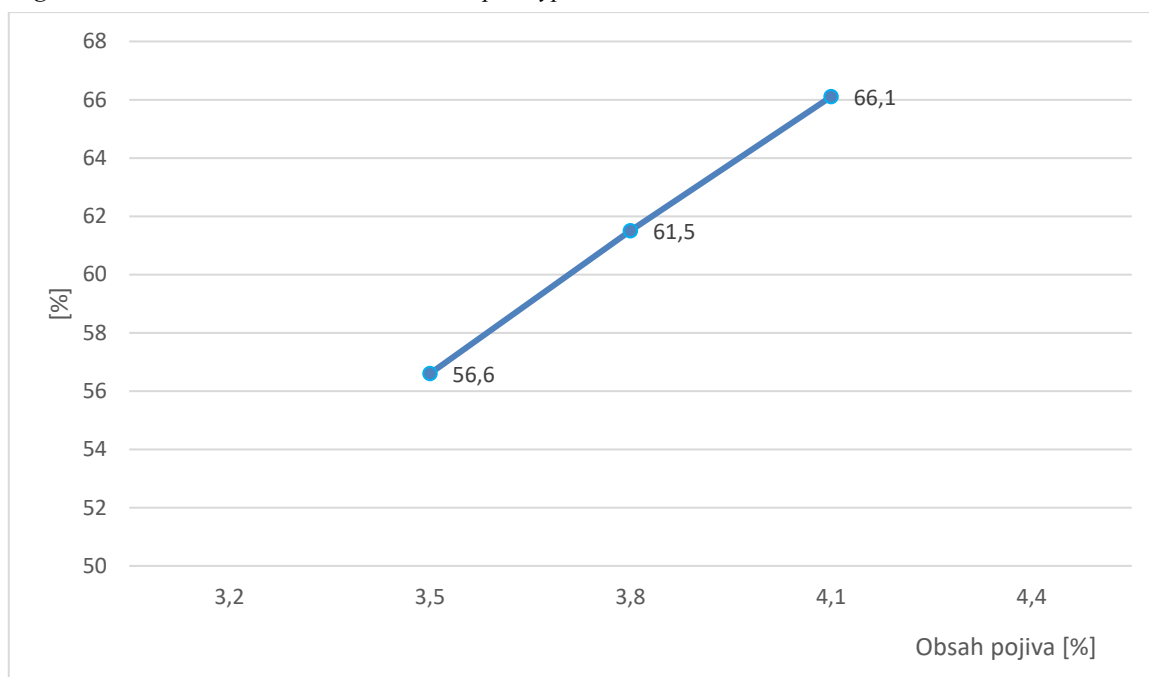
Legenda k Obrázku 25: — mezerovitost

Z grafu na Obrázku 24 a 25 vyplývá, že mezerovitost obou směsí je přibližně stejná, ale ve směsi s recyklovaným asfaltem bylo použito více pojiva pro dosažení stejné kvality. V obou zkušebních směsích bylo použito tvrdší asfaltové pojiva s označením 50/70.



Obrázek 26 - Stupeň vyplnění mezer (40 % recyklovaný asfalt)

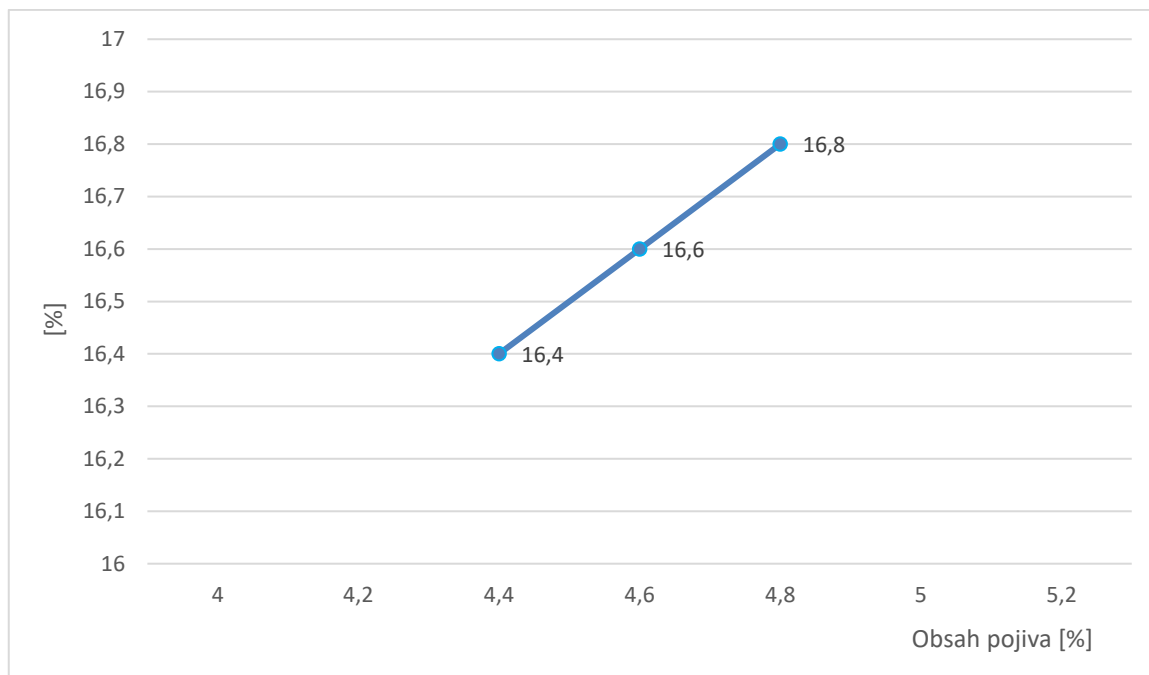
Legenda k Obrázku 26: — stupeň vyplnění mezer



Obrázek 27 - Stupeň vyplnění mezer

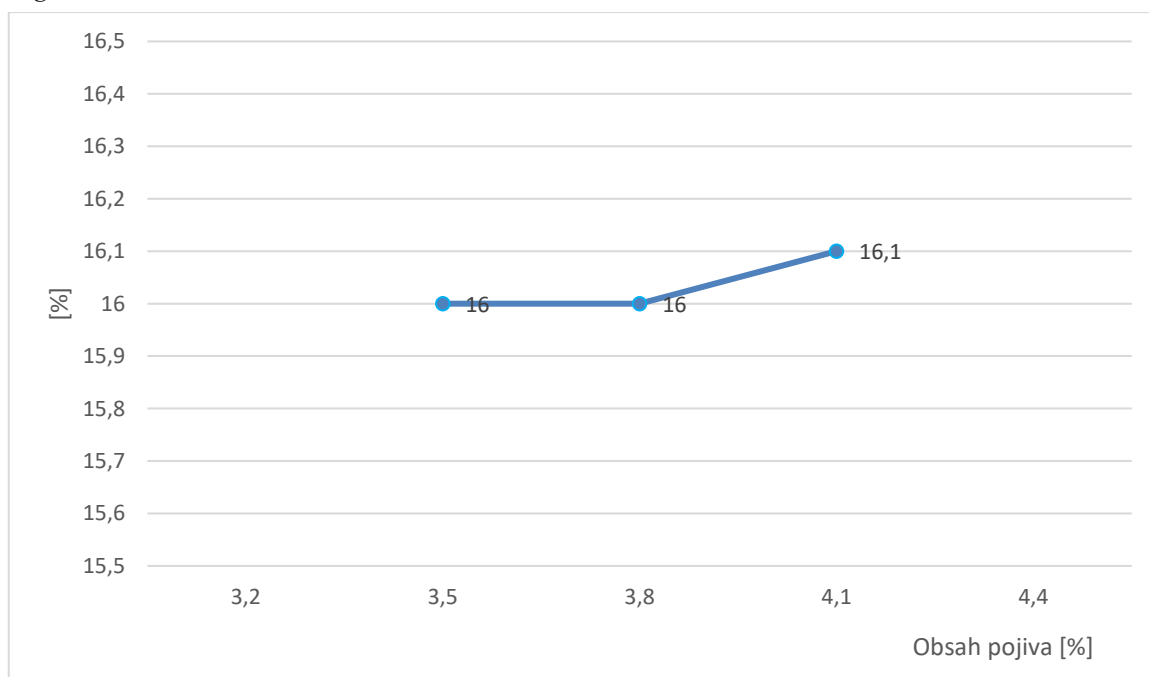
Legenda k Obrázku 27: — stupeň vyplnění mezer

Na Obrázku 26 a 27 jsou uvedeny hodnoty v závislosti na stupni vyplnění mezer mezi asfaltem a pojivem. Z grafů vyplývá, že potencionální optimální množství pojiva pro asfaltovou směs s recyklátem je 4,6 %. Pro směs bez recyklátu hodnota odpovídá 3,8 %.



Obrázek 28 - Mezerovitost směsi kameniva a recyklátu (40 % recyklovaný asfalt)

Legenda k Obrázku 28: — mezerovitost směsi kameniva



Obrázek 29 - Mezerovitost směsi kameniva

Legenda k Obrázku 29: — mezerovitost směsi kameniva

Mezerovitost směsí kameniva vychází z množství pojiva, stupně mezerovitosti mezi asfaltem a pojivem a objemové hmotnosti. Pro asfaltové směsi pro podkladní vrstvy určuje norma hodnotu mezi 15 až 17 % při použití obsahu pojiva 4 až 5 %.

Výsledky laboratorních zkoušek u betonových směsí vykazují v některých případech zlepšené vlastnosti při použití stavebního odpadu. Tento jev lze přisuzovat použité chemické přísadě (plastifikátor), které v betonové směsi nahrazuje vodu. Obsah cementu zůstal neměnný oproti receptuře bez recyklátu. To má za důsledek zvětšenou pevnost betonu v tlaku.

Betony s recyklovaným betonem lze vyrábět do třídy C 35/45, podle které pevnost v tlaku nesmí klesnout pod 50 MPa. Betony s vyšší třídou pevnosti nebyly vyzkoušeny.

Pro kontrolu vlastností bylo vyrobeno 12 zkušebních vzorků totožné receptury s recyklátem a bez recyklátu. Pro vyhodnocení zkoušek byly posuzovány tyto vlastnosti : Pevnost betonu v tlaku, teplota čerstvého betonu a sednutí kužele.

Ověření vlastností betonu s cihelným recyklátem byly vyrobeny 3 zkušební vzorky s recyklátem a 3 bez recyklátu. Byla zkoumána pouze pevnost v tlaku, která vykazovala podobné výsledky jako směs s betonovým recyklátem. Pevnost byla mírně navýšena v důsledku použití nanofilleru pro směsi s cihelným recyklátem, který nahrazuje část vody v receptuře.

U asfaltových směsí byly z vozovky vyvrtány zkušební tělesa, vždy 5 od každé směsi. Byly zkoumány tyto vlastnosti : síťový rozbor, mezerovitost, obsah pojiva, stupeň vyplnění mezer, objemová hmotnost a mezerovitost směsi kameniva a recyklátu. Z výsledků vyplývá, že při zvýšení množství pojiva o 1 % celkové hmotnosti směsi, vykazuje směs se 40 % recyklátu stejné vlastnosti jako směs pouze s přírodním kamenivem.

5 ZÁVĚR

Porovnání výsledků laboratorních zkoušek betonu s přírodním kamenivem, recyklovaným betonem a recyklovaným cihelným odpadem vykazuje toto zjištění.

Recyklovaný beton ve frakci 8 až 16 mm nahrazuje v receptuře v této práci přírodní drcené kamenivo stejné frakce. Drcené kamenivo má z výroby ostré hrany a tudíž i lepší pojivost s ostatními vstupními materiály. Na rozdíl od toho recyklovaný beton je spíše kulatého tvaru. Pro zachování stejné pojivosti byl přidán do receptury plastifikátor MasterGlenium 115. 1 kg této přísady nahrazuje zhruba 10 l vody, proto vychází pevnost betonu s recyklovaným betonem vyšší než u přírodního kameniva.

Receptura s recyklovaným cihelným odpadem vykazuje stejné, někdy i větší pevnosti v tlaku než beton s přírodním kamenivem. Je to opět dáno použitím speciální přísady, které se označuje jako nanofiller. Tato přísada nahrazuje vodu v betonu, avšak ne v takové míře jako u recyklovaného betonu. Z výsledků lze vidět nepatrný nárůst

Porovnání výsledků směsi se 40 % recyklovaného asfaltu a zkušební směsi pouze z přírodního drceného kameniva byly zjištěny tyto údaje. Použité pojivo bylo stejné s označením 50/70. U recyklovaného asfaltu bylo použito více pojiva, přibližně o 1 % celkové hmotnosti asfaltové směsi. Za těchto podmínek vykazovala asfaltové směs stejné údaje a tím pádem i kvalitu. Dle síťového rozboru bylo zjištěno, že asfaltový recyklát odpovídá přesně frakci 0 až 16 mm. Směs s přírodním kamenivem vykazovala určitý podíl nadsítňného materiálu o velikosti větší než 16 mm. V tomto případě je nutné dbát na pečlivost při vytváření deponií a manipulace s materiálem, aby nedocházelo ke smíchání šterků a recyklátu vyšší frakce.

Pro použití většího poměru asfaltového recyklátu by se opět musel zvýšit poměr pojiva ve směsi a provést příslušné laboratorní zkoušky.

Dodržením postupů při recyklaci a důsledné separaci odpadů přímo v místě vzniku dochází ke správnému fungování oběhového hospodářství. Použití recyklovaných materiálů má za důsledek snižování odpadů a snížení primárních zdrojů ve výrobě.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. AHMAD M., CHEN B., SHAH S. (2020). Mechanical and microstructural characterization of bio-concrete prepared with optimized alternative green binders. In: *Science Direct*. [online]. [cit. 2021-01-25]. Dostupné na WWW: <[sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821002932](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821002932)>.
2. AKONO A., ZHAN M., CHEN J., SHAH S. (2020). *Nanostructure of calcium-silicate-hydrates in fine recycled aggregate concrete*. Science Direct [online] [cit. 2021-02-26]. Dostupný na WWW: <[sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946520303322](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946520303322)>
3. AUJEZDSKÝ J. (2019). Češi vyvinuli recyklovaný beton. K jeho výrobě se využívá stavební suť. In: *UpCycling*. [online]. [cit. 2021-29-03]. Dostupné na WWW: <<https://www.upcycling.cz/cesi-vyvinuli-recyklovany-beton-k-jeho-vyrobe-se-vyuziva-stavebni-sut/>>.
4. BEŇO, Z. (2011). *Recyklace: efektivní způsoby zpracování odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 149 s. ISBN 978-80-214-4240-5.
5. BETONSERVER. (2019). *Základní druhy recyklátů a možnosti jejich získávání* [online] [cit. 2021-18-03]. Dostupné na WWW: www.betonserver.cz/aktuality/zakladni-druhy-recyklatu-a-moznosti-jejich-vyuziti-jakostni-normy
6. BOURAIMA M., ZHANG X., RAHMAN A., QIU A. (2019). A comparative study on asphalt binder and mixture performance of two traffic lanes during hot in-place recycling (HIR) procedure. In: *Construction and Building Materials*. 223 p. ISSN 0950-0618
7. BRITO D., SAIKIA J. (2013). *Recycled Aggregate in Concrete*. London: Springer-Verlag, 703 p. ISBN 978-1-4471-4539-4.
8. ČERMÁK J. (2020). Beton s použitím recyklovaného kameniva. In: *Stavebnictví, ročník 20, číslo 4*. 73 s. ISSN 1802-2030.
9. ČSN EN 71 1326. (1985). *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 12 s.

10. ČSN EN 71 1321. (1988). *Stanovení vodotěsnosti betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 4 s.
11. ČSN EN 12697-8. (2004). *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 12 s.
12. ČSN EN 13286-47. (2005). *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 12 s.
13. ČSN EN 12697-6+A1. (2008). *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 16 s.
14. ČSN EN 933-11. (2009a). *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 16 s.
15. ČSN EN 12591. (2009b). *Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 28 s.
16. ČSN EN 12350-5. (2009c). *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 16 s.
17. ČSN EN 12350-7. (2009d). *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 20 s.
18. ČSN EN 12390-7. (2009e). *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 12 s.
19. ČSN EN 12390-3. (2009f). *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 20 s.

20. ČSN EN 12390-8. (2009g). *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 8 s.
21. ČSN EN 13286-2. (2011). *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška*. Praha: Český normalizační institut. 2 s.
22. ČSN EN 933-1. (2012). *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 12 s.
23. ČSN EN 12697.5. (2010). *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 24 s.
24. ČSN EN 12697-2. (2015). *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 2: Stanovení zrnitosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 12 s.
25. ČSN EN 206+A1. (2018a). *Beton. Vlastnosti, výroba, ukládání a kontrola shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 88 s.
26. ČSN EN 12697-27. (2018b). *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 27: Odběr vzorků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 24 s.
27. ČSN EN 12350-2. (2019). *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 16 s.
28. EBETON. (2019). Monolitický beton. In: *Ebeton*. [online] [cit. 2021-01-03]. Dostupný na WWW: <ebeton.cz/pojmy/monoliticky-beton-konstrukce>
29. EDOARDO B. (2018). Use of ladle furnace slag as filler in hot asphalt mixtures. In: *Construction and Building Materials*. 161p. ISSN 0950-0618.
30. GAUTAM L., JAIN J., KALLA P., CHOUDHARY S. (2020). A review on the utilization of ceramic waste in sustainable construction products. In: *Materials Today: Proceedings*. ISSN 2214-7853.

31. GEHRIG S. (2019). *A low carbon, circular economy approach to concrete procurement*. City of Zurich. [online]. [cit. 2021-04-04]. Dostupné na WWW: <ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/news_alert/Issue_88_Case_Study_168_Zurich.pdf>.
32. HERKUL. (2015). *Provozní řád recyklační plochy HERKUL a.s.* Most. 31 s.
33. HERKUL. (2018). *Systém řízení výroby betonárny HERKUL a.s.* Most. 29 s.
34. HERKUL. (2019). *Systém řízení výroby obalovny HERKUL a.s.* Most. 32 s.
35. HLŮŽEK R., NEŽERKA V. (2019). Vliv příměsí na smrštění a vývoj mikrotrhlin v cementových pastách s betonovým recyklátem. In: *WASTE FÓRUM*. s. 173-174. ISSN 1804-0195.
36. HÝZL P. (2019). *Opětovné použití asfaltových směsí a recyklace*. VUT FAST Brno. [online]. [cit. 2020-17-03]. Dostupné na WWW: <asfaltove-vozovky.cz/av2019/data/prezentace/t1-2_hyzl.pdf>.
37. CHENGJIA H., TAO M, GANGJI X., SIYU CH. (2020). A multi-factor analysis approach for recycled asphalt mixture stockpile center location. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86. pp. 1-14. ISSN 1361-9209
38. CHROMKOVÁ I., ČECHMÁNEK R., ZAVŘEL L., SEDLÁK J., ŠEVČÍK M. (2019). Použitelnost teplárenské strusky jako náhrady drobného kameniva do betonu. In: *WASTE FÓRUM*. pp. 173-175. ISSN 1804-0195.
39. JANDA M., ZICH M., DANĚK P. (2019). Věda a výzkum. In: *BETON*. 64 s. ISSN 1213-3116.
40. JEGATHEESAN A., MAHDI P. (2014). Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation. In: *Journal of Materials in Civil Engineering*. [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné na WWW: <researchgate.net/publication/260392261_Reclaimed_Aspphalt_Pavement_and_Recycled_Concrete_Aggregate_Blends_in_Pavement_Subbases_Laboratory_and_Field_Evaluation>

41. JUNGSMANN, J., KOTOVICOVÁ, J., ŠKOPÁN M., ŠTASTNÝ M., ŠULC P., ZIMOVÁ M., HYŽÍK J. (2018). Stavební odpady In: *ODPADOVÉ FÓRUM*, ročník 19, číslo 3. 42 s. ISSN 1212-7779.
42. JUNTATO, D., JUN. Z., SZE DAJ. P., SHUNBO. Z.. (2012). *Construction and Building Materials*. [online]. [cit. 2020-12-01]. Dostupné na WWW: <sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820320377>.
43. KOLÁŘ, K., REITERMAN, P. (2012). *Stavební materiály pro SPŠ stavební*. Praha: Grada, 208 s. ISBN 978-80-247-4070-6.
44. KULOVANÁ, E., ČERNÝ, M., ONDRAČKA, T., KOIŠ, J., KRESA, J., JOHN, J., JJANČÁŘ, J. (2019). Využití výmětu pro přípravu polymerbetonu. In: *WASTE FÓRUM*. 173 s. ISSN 1804-0195.
45. KUNCL, V. (2019). Jak nakládat s asfaltovými směsmi? Kdy je asfalt vedlejším produktem a kdy odpadem? In: *Třetí ruka*. [online]. [cit. 2021-04-04]. Dostupné na WWW: <tretiruka.cz/news/jak-nakladat-s-asfaltovymi-smesmi-kdy-je-asfalt-vedlejsim-produktem-a-kdy-odpadem/>.
46. MANJUNATHA, M., PREETHI, S., MALINGARAYA, H., G. MOUNIKA, K., N. NIVEDITHA, R. (2021). Life cycle assessment of concrete prepared with sustainable cement-based materials. In: *Materials .Today: Proceedings*. 25 p. ISSN 2214-7853.
47. MIKLASOVÁ, M. (2021). Nakládání se stavebními a demoličními odpady. In: *Třetí ruka*. [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné na WWW: <tretiruka.cz/news/nakladani-se-stavebnimi-a-demolicnimi-odpady-recyklaty/>.
48. MOHAN, M., PILLAI, R., SANTHANAM, M., GETTU, R. (2021). *High-performance cementitious grout with fly ash for corrosion protection of post-tensioned concrete structures*. Science Direct [online]. [cit. 2021-02-03]. Dostupné na WWW: <sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182100372X>.
49. MŮJBETON. (2020). Kamenivo v betonu. In: *Mujbeton*. [online]. [cit. 2021-20-03]. Dostupné na WWW: <https://www.muj-beton.cz/kamenivo-v-betonu>.,
50. NOVÁKOVÁ, I., MIKULICA, K. (2018). *Faktory ovlivňující kvalitu recyklovaného betonového kameniva*. VUT FAST Brno: Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

- [online]. [cit. 2020-11-11]. Dostupné na WWW: <stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18061-factory-ovlivnujici-kvalitu-recyklovaného-betonového-kameniva>.
51. OHEMENG, R., EKOLU, S. (2020). Comparative analysis on costs and benefits of producing natural and recycled concrete aggregates: A South African case study. In: *Case Studies in Construction Materials*. 13 p. ISSN 2214-5095.
52. SHEWALUL, Y. (2021). Experimental study of the effect of waste steel scrap as reinforcing material on the mechanical properties of concrete. In: *Science Direct*. [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné na WWW: <sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952100005X>.
53. STRYK, J., GREGEROVÁ, M., FRÝBORT, A., ŠTULÍŘOVÁ, J., GROŠEK, J. (2019). Analýzy betonů provozovaných cementobetonových krytů vozovek prováděné na vývrtech – možnosti a nové trendy. In: *BETON*. 72 s. ISSN 1213-3116.
54. SYKA, R., HUBÁČEK, A. (2019). Materiály a technologie. In: *BETON*. 64 s. ISSN 1213-3116.
55. TOMEK, G., VÁVROVÁ, V. (2014). *Integrované řízení výroby*. Praha: Grada. 366 s. ISBN 978-80-247-9106-7.
56. VACKOVÁ, P., KOTOUŠOVÁ, A., VALENTIN, J. (2018). Use of recycled aggregate from blast furnace slag during in the design of asphalt mixtures. In *WASTE FÓRUM*. 72 s. ISSN 1804-0195.
57. WEN, Y., GUO, N., WANG, L., JIAO, B., LI, W. (2021). Rheological properties and microscopic mechanism of rock asphalt composite modified asphalts. In: *Science Direct*. [online] [cit. 2021-03-10]. Dostupné na WWW: <sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061821003032>.
58. WINKLER, G. (2010). *Recycling Construction and Demolition Waste*. Rocky Road (CA): McGraw Hill Professional. 296 p. ISBN 978-00-717-1338-2.
59. ZÁKON č. 541/2020 Sb. (2020) Zákon o odpadech. In : Sbírka zákonů České republiky

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 - Kamenivo</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 2 - Písek.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 3 - Asfaltové kry.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 4 - Betonový recyklát.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 5 - Betonové kry.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 6 - Cihlový recyklát</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 7 – Obalovna živičných směsí HERKUL Most.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 8 – Betonárna HERKUL Most</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 9 - Vzorky betonu.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 10 - Nástroj pro určení sednutí betonu</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 11 - Kostky pro zkušební vzorky betonu</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 12 - Extrakční přístroj</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 13 - Prosévací přístroj.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 14 - Sednutí kužele.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 15 - Teplota čerstvého betonu</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 16 – Pevnost v tlaku po 28 dnech.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 17 - Pevnost v tlaku po 28 dnech.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 18 - Křivka zrnitosti (40 % recyklovaný asfalt)</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 19 - Křivka zrnitosti.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 20 - Objemová hmotnost tělesa (40 % recyklovaný asfalt).....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 21 - Objemová hmotnost tělesa</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 22 - Maximální objemová hmotnost tělesa (40 % recyklovaný asfalt)</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 23 - Maximální objemová hmotnost tělesa.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 24 - mezerovitost (40 % recyklovaný asfalt)</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 25 - Mezerovitost.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 26 - Stupeň vyplnění mezer (40 % recyklovaný asfalt)</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 27 - Stupeň vyplnění mezer.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 28 - Mezerovitost směsi kameniva a recyklátu (40 % recyklovaný asfalt).....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 29 - Mezerovitost směsi kameniva.....</i>	<i>53</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 - Data výroby a odběru vzorků (betonový recyklát)</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 2 - Data výroby a odběru vzorků (cihelny recyklát)</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 3 - Podíl hmotnosti vstupních surovin (40 % recyklovaný asfalt)</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 4 - Sítový rozbor vstupních surovin (40 % recyklovaný asfalt)</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 5 - Podíl hmotností vstupních surovin</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 6 - Sítový rozbor.....</i>	<i>47</i>